

Title	ソイルモルタルによる建設発生土の高度利用に関する研究(Dissertation_全文)
Author(s)	有岡, 正樹
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2002-03-25
URL	http://dx.doi.org/10.14989/doctor.r10932
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author

ソイルモルタルによる
建設発生土の高度利用に関する研究

平成14年 1月

有 岡 正 樹

まえがき

空白の10年間と揶揄される1990年代を経て、確たる方向を見出さないまま混迷の21世紀を向かえた。そのような状況の中で、圧倒的な国民の支持を得て成立した小泉内閣のもと、抜本的な構造改革が動き出した。その改革の基本方針である、いわゆる「骨太の方針」の具体的な手順として、

- ① 経済社会の活性化
- ② 豊かな生活とセーフティネットの充実
- ③ 政府機能の強化と役割の抜本的見直し

を前提とする「躍動の10年」が議論されている。そして、その具体的な重点推進のための7つの分野が設定されているが、その優先順位のトップに「循環型社会の構築」という形で、環境問題への対応が位置付けられている。

もちろん、このような循環型資源利用社会の構築への動きは、今回の「骨太の方針」に始まったことではなく、第1章でも触れるように長年の歴史的な背景がある。いわゆる廃棄物に関する法制度は、1927年（昭和2年）「汚物掃除法」に遡り、戦後も数回にわたって見直しがなされてきたが、それらはいずれも文字通り廃棄物としての処分の仕組みに関わるものであった。

これに対して、近年に入り廃棄物の増大と最終処分場の減少に対応するため処分量の減容化が重要視されるようになり、それを目指しての7省庁共管による「再生資源利用の促進に関する法律」（「リサイクル法」）が1991年（平成3年）に制定されるが、これが循環型資源利用への動きの端緒といえよう。その後、21世紀を翌年に控えての2000年（平成12年）になって、「循環型社会形成推進基本法」が制定され、今回の骨太方針への具体策へと繋がっていくことになる。

一方、筆者が身を置く建設産業界においても、これらの動きに呼応するかたちで、「建設副産物対策行動指針」（いわゆる「リサイクルプラン21」；1994年）、「建設リサイクル推進計画'97」（1997年）などが策定され、さらには2000年（平成12年）に上記「循環型社

表-1 リサイクルプラン 21

種 類	平成12年度有効利用目標率
建設廃棄物全体	80%（58%）
アスファルト・コンクリート塊	90%（81%）
コンクリート塊	90%（65%）
建設汚泥	60%（14%）
建設混合廃棄物	50%（11%）
建設発生木材	90%（40%）
建設発生土	80%（32%）

注）（ ）内は平成7年度全国平均実績

会形成推進基本法」を受けて「建設リサイクル基本方針」を策定し、「リサイクルプラン21」を見直しているが、その中で平成12年度における有効利用目標率（リサイクル率）を表－1のように定めている。本研究のソイルモルタルの主材料でもある建設汚泥の有効利用率が低いことが理解されよう。

平成14年度には「再生資源利用促進法」（リサイクル法）を受けて制定された「建設工事に係る特定資材の資源化に関する法」（建設リサイクル法）が本格施行の段階に入らる中で、建設産業界は総合的かつ明確な環境戦略に基づいた事業の再構築に動き出した。その一つとして、地球資源としての建設材料のリユース、リサイクルを前提にした、新しい設計・施工概念に基づく建設エンジニアリングの再編も急務の課題である。

このような歴史的な経緯の中で、筆者はこれまで建設現場において、建設発生土または建設汚泥を原位置で利用するソイルモルタル技術の研究開発と実用化を行い、建設業における環境問題としてのリサイクルに関わってきた。表－2に示すように、遡ること30余年前の地下鉄工事現場時代に始まり、途中オーストラリア駐在や営業関係業務担当の10年を除いて、現場発生土の有効利用に関する研究開発に意識と情熱を傾けてきた。

本論文は、原位置における個別的な安定処理・地盤改良に関する研究成果や、複数現場間におけるリサイクルのための新しいソイルモルタル工法の研究開発と情報・施工管理システム運用のあり方、さらには今後の新しい展開についての考え方を述べるものである。

表－2 著者のソイルモルタル技術の研究開発経歴

年	筆者の経歴	ソイルモルタル技術の研究展開	建設分野における技術動向
1969	地下鉄・共同溝現場	粘土・シルトの遮水壁への応用	一部改良を含む埋立処分
		↓	
		P I P 柱列土留壁への応用	
		↓	SMW工法の開発
1983		ケイソイル工法への展開	
1984	オーストラリア駐在	↓	泥水固化壁工法の開発
1991			
1991	営業本部他	↓	
1993			
1994	地下鉄現場	シールド発生土の埋戻し材への有効利用(ReSM工法)	流動化処理工法の開発
1997			
1997	エンジニアリング本部	ReSM工法の展開、新しい施工管理システムの提案	流動化処理工法研究会 ReSM工法研究会
1999			

— 目 次 —

まえがき

第1章 研究開発の背景と論文の概要

1.1 はじめに	1
1.2 研究開発の背景	4
1.2.1 建設発生土の有効利用に関する制度的環境	4
1.2.2 建設汚泥の処理と有効利用	10
1.2.3 建設発生土の有効利用とソイルモルタル	12
1.3 建設汚泥利用の現況	14
1.3.1 建設汚泥発生工事の概要	14
1.3.2 建設汚泥の改良技術と有効利用事例	23
1.3.3 建設汚泥の有効利用に関する課題	35
1.4 研究開発の視点と本論文の構成	40
1.4.1 研究開発の視点	40
1.4.2 論文の構成	40
1.4.3 論文の要旨	42
参考文献	48

第2章 建設泥土を用いたソイルモルタルの材料特性と適用分野

2.1 はじめに	51
2.2 ソイルモルタルの高度利用化と材料特性	53
2.2.1 注入工法	53
2.2.2 遮水壁工法	56
2.2.3 埋戻し・充填工法 (ReSM工法)	58
2.2.4 表層遮水層工法	64
2.2.5 軽量土埋立て工法	66
2.3 粘土注入工法の研究開発	67
2.3.1 大阪粘土の注入材としての適用性	67
2.3.2 粘土注入材の強度・透水性状	73

2. 4 粘土モルタル遮水壁工法の研究開発	78
2. 4. 1 地中連続壁工法への適用	78
2. 4. 2 ケイソイル工法	88
2. 5 ReSM工法による埋戻し・充填工法の研究開発	93
2. 5. 1 概要	93
2. 5. 2 ソイルモルタルの強度特性	94
2. 5. 3 ソイルモルタルの圧縮特性	99
2. 5. 4 ソイルモルタルの透水特性	114
2. 6 ソイルモルタルによる表面遮水工法の研究開発	115
2. 6. 1 ひび割れ発生メカニズムに関する基礎実験結果	115
2. 6. 2 斜面表層遮水層構築に関する基礎実験結果	123
2. 6. 3 現場における実験結果	133
2. 6. 4 アルカリ性イオンの周辺地盤への影響	136
2. 7 気泡軽量混合土による埋戻し工法の研究開発	138
2. 7. 1 実験概要	138
2. 7. 2 実験結果とその考察	142
2. 7. 3 水中打設の影響	147
2. 7. 4 今後の課題	153
2. 8 おわりに	155
参考文献	158

第3章 ソイルモルタル高度利用化工法の現場適用事例

3. 1 はじめに	161
3. 2 現場実験にみる粘土注入適用事例	163
3. 2. 1 注入対象地盤	163
3. 2. 2 第1次現場注入実験	164
3. 2. 3 第2次現場注入実験	168
3. 3 地下鉄工事他における粘土モルタル遮水壁工法	176
3. 3. 1 大規模現場実験	176
3. 3. 2 滞水砂れきシールド遮水壁としての施工例	183
3. 3. 3 その他の施工事例	189
3. 4 地下鉄工事におけるReSM埋戻し施工	193
3. 4. 1 シールド発生土を用いたReSM埋戻し工事概要	193

3. 4. 2 シールド残土によるソイルモルタル埋戻し結果	201
3. 4. 3 ソイルモルタルの埋戻し土としての妥当性	210
3. 5 ReSM工法によるトンネル空洞充填工事	217
3. 6 おわりに	224
参考文献	228

第4章 ソイルモルタルマネジメントシステム

4. 1 はじめに	231
4. 2 計画・設計の考え方	233
4. 2. 1 地盤安定処理におけるバラツキの概念	233
4. 2. 2 地盤構造物としての安産生の考え方	235
4. 2. 3 精密地盤改良システムとは	236
4. 3 ロジスティックシステムとリスクマネジメントの考え方	242
4. 3. 1 施工管理の考え方	242
4. 3. 2 ロジスティック管理システムの考え方	246
4. 3. 3 リスクマネジメント	248
4. 4 スーパー堤防構築への適用に関する一考察	255
4. 5 おわりに	258
参考文献	259

第5章 結論

5. 1 総括	261
5. 2 適用分野ごとの結論	265

謝 辞

第1章 研究開発の背景と論文の概要

1. 1 はじめに

(1) 建設工事における発生土とは何か？

土(soil)とは、岩石の風化・崩壊や有機物の分解などによって生成された未固結な堆積物の一般的な呼称であり、地層の表層部を構成している物質のうちで、堅固な岩石を除いた物質に対して付けられた名称といえる。土は通常、土粒子・水・空気によって構成されており、土粒子とは礫、砂、シルト、粘土、コロイドといわれている土質材料の総称である。土粒子を構成しているほとんどの物質の起源は火成岩である。堆積岩、変成岩といわれているものも、その起源は火成岩であり、岩石が崩壊してできた碎屑物、生物の遺骸、火山噴出物などが水中または陸上で物理的、化学的に沈殿し、堆積したものを堆積物(sediment, deposit)という。その堆積物が造成作用によって再び固化することを固結といい、いまだ固結していない堆積物のことを未固結堆積物という。ほとんどの土は未固結堆積物である。

沖積平野におけるシールド工事や建築基礎工事などにおける発生土は、運積土(水や空気によって運搬されて生成された土)であることが多く、崩積土、地すべり崩積土、沖積土(河成土、海成土)、風積土(砂丘など)、火山性堆積土、氷積土、融水流堆積土など、さまざまな粒径、組成の土粒子の混在したものである。このように掘削する地盤材料としての土の多様性から、発生土は同一現場内においても、掘削地点、深度によって性状は大きく異なる。

また、掘削工法によっても、開削工事から発生する掘削物は、礫、砂、シルト、粘土が混在する高含水の状態であり、場合によってはベントナイトやセメントなどを含む状態のものである。砂質土は土木資材としてそのまま使用できるが、シルトや沖積粘土のような高含水の掘削土は、分級・脱水・固化などの処理をしなければ、搬出や再利用ができないことから、一般に「低品質」の発生土といわれる。

(2) 建設発生土有効利用の概要

近年、既設処分場の残容量の逼迫性や環境問題による新規埋立処分場の立地が困難であることから、廃棄物の処理は大都市圏を中心に大きな問題となっており、法体系の整備をはじめとする様々な取組みが進められている。これら取組みの主体は、排出量の削減とリサイクルであり、50年後には埋立処分量を1/10まで低減する目標が掲げられている。建設業においても、建設工事によって生じる廃棄物の処理・処分は大きな問題となっており、当面リサイクルを中心として処分場の延命化、または処分場への廃棄物搬入を極力減らすことが国として大きな命題となっている。このような観点からリサイクルを押し進めるために、1991年(平成3年)にリサイクル法が制定されたが、この中で建設副産物として「建設残土」、「コンクリートガラ」、「アスファルトコンクリート」および「木くず」が建設廃棄物として位置づけられている。これに基づく具体的なアクションプランとしては、1994年4月に各地方ごとの建設副産物対策連絡協議会において建設副産物対策行動計画(リサイクルプラン21)が

策定された。また、「建設廃棄物等対策推進会議」の提言を受けて1997年10月には、リサイクルの一層の促進を図るための建設リサイクル推進計画が策定された。

この計画の内容は、建設リサイクル推進に向けた基本的考え方、目標、具体的施策であり、建設発生土についての目標は、「将来的には、建設工事に必要となる土砂は原則として工事間流用でまかなうこととして、当面2000年までに公共系工事での利用率については、リサイクルプラン21の目標値を見直し、まえがきの表-1に示したように建設廃棄物全体のリサイクル率を70%から80%に引き上げる」とされている。

さらに他産業の再生資材を建設分野に積極的に有効利用する動きも加速しており、建設業においてもリサイクル技術は必要不可欠のものとなると考えられる。

一方それらの動向に対し、建設分野で大幅な利用率向上のためには、以下の課題があることが指摘されている。

- ① 技術基準の設定
- ② 利用技術の開発
- ③ 発生および利用需要に関する情報交換システムの整備
- ④ 改良プラントやストックヤードの整備
- ⑤ これらの整備を前提とした利用調整体制の強化

などである。

このうち、建設発生土の①の技術基準および②の利用技術の開発については、建設省大臣官房技術調査室監修の「建設発生土利用技術マニュアル」¹⁾ならびに「発生土利用促進のための改良工法マニュアル」²⁾が示され、これらのマニュアルに整理された各種工法やそれらの組合せ等により、発生土の一層の利用を図ることが求められている。ただし、③の情報交換システムの整備や④のストックヤード等の施設整備、さらには⑤の利用調整体制の強化に関する事項については、ようやく事業毎、現場毎に行われはじめた現時点においては未だ課題が残されており、今後大規模なリサイクルセンターが有効活用され、かつ民間の各種リサイクルプラントが新事業として形成されるのに従って、情報管理、プラント管理・運用、流通などのシステム化が進むと考えられる。

このように発生土有効利用においては、法体系、技術体系は整備されつつあり、建設業界においても、この発生土のリデュース、リサイクル、リユースのための新しい利用技術が次々と開発されつつある。

しかし、土はコンクリートや鋼材のような規格化された材料ではなく、その性状は多種多様である。特に建設工事に伴って副次的に得られる発生土の性状は、購入土や採取土以上に、地盤構成や工事内容により、その粒度組成、含水比、成分などのばらつきが大きい。発生土のうち、いわゆる「良質な」土砂は発生側において場内利用されたり、流通段階で有価材として販売されたりして、有効利用やリサイクルが容易であることから、今後リサイクルの対象は、高含水土、礫混じり土、コンクリートガラ混入土、木材などの混入土、脱水ケーキ、改良材・添加剤混入土など、比較的「低品質な」ものが多くなると考えられる。したがって、

大幅にリサイクル率を向上させるためには、各種の品質改良や施工上の工夫により「低品質な」発生土の利用を図ることが不可欠となる。

このように建設発生土を利用して構造物基礎を構築する場合、基礎地盤は構造物基礎として十分に安全な強度を持つことが必要である。土堰堤や河川堤防などでは、斜面の安定と同時に貯水されたときの安定性も保証されなければならない。また、道路や鉄道では車両走行に十分な支持力が必要である。

一方、生活環境としての地盤・土壌は、われわれの食料生産基盤としての農地、草や木の生育基盤としての森林として、土の存在無くしては考えられず、土は雨水を一時的に貯え植物の生育に必要な水分を補給すると共に、河川水の涵養、汚水の浄化など水資源を保全する機能を必要としている。また、熱エネルギーの貯蔵庫として太陽エネルギーの一時的貯留を行い、動植物の生活環境を保全する機能が求められる。

以上のような地盤のもつ多面的な役割に対し、今回の研究の対象は構造的な機能が中心となり、地盤・土壌に要求される役割の一面でしかない点を認識しておく必要がある。本章では、建設汚泥や粘性土といった低品質な発生土を、そのような視点での有用な地盤材料に変換させるための、制度的、技術的側面についてその現状と課題を整理し、それらを背景としての本研究の構成と論文の概要について記述するものである。

1. 2 研究開発の背景

建設工事に係わる発生土については、その「適正な処分」という守りの部分と「再利用の促進」という攻めの部分とが拮抗して、必ずしも合理的な対応がとられてきたとは言えない側面があったが、1990年代の後半に入って「循環型社会の構築」を目指しての制度面での検討や、現場を中心としての研究開発への積極的取り組みを経て、新しい段階に入ろうとしている。本節では、その制度的、技術的展開の経緯と、それらを背景として筆者が取り組んできたソイルモルタルの概要について述べることにする。

1. 2. 1 建設工事における発生土の有効利用に関する制度的環境

(1) 廃棄物処理法と建設副産物

我が国の廃棄物に関する法制度は、1927年（昭和2年）の「汚物掃除法」の制定に始まる。ペストなどの伝染病が流行し、汚物処理を重視するようになって同法を制定し、ごみ処理を市町村の責任とした。さらに1954年（昭和29年）に「清掃法」を制定し、ごみおよびし尿処理の近代化を進めたが、経済成長に伴って廃棄物の増大と質的变化が著しくなり、1970年（昭和45年）に抜本的な処理体制の見直しを行って「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」（本論文では「廃棄物処理法」と略称）を制定するところとなる。これにより、廃棄物の定義を拡大するとともに、市町村での処理が困難な産業廃棄物とそれ以外の一般廃棄物を区別し、廃棄物の処理責任を明確にした。その後、最終処分場の確保のために1992年（平成4年）には、「特定施設整備法」が制定されている。

一方、最終処分量を減少させるため、1991年（平成3年）には7省庁（建設省、通産省、

表 1-1 廃棄物の処理及び清掃に関する法律による有用物と不要物の分類⁵⁾

有用物	法適用除外物 ① 他人に有償売却できるもの ② 他人に有償売却できる性状のものを占有者が自ら利用するもの
不要物	① 法適用物 他人に有償売却できないもの、規格基準に合わないものを使用することは「自ら利用に」には該当しないので、廃棄物処理法の適用を受ける <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; margin-right: 10px;">廃棄物</div> <div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> 事業系廃棄物 （事業活動に伴って生じたもの） </div> <div> 産業廃棄物 <div style="margin-left: 20px;"> 特別管理産業廃棄物 建設系廃棄物等 </div> </div> </div> <div style="margin-left: 100px;">↓</div> <div> 生活系廃棄物 （一般家庭の日常生活に伴って生じたもの） <div style="margin-left: 20px;"> 一般廃棄物 <div style="margin-left: 20px;"> ごみ <div style="margin-left: 20px;"> 事業系ごみ 生活系ごみ </div> </div> </div> </div> </div> </div>

特別管理一般廃棄物

農林水産省、大蔵省、厚生省、運輸省、および環境庁：いずれも当時）の共管による「再生資源の利用促進に関する法律」（本論文では「リサイクル法」と略称）の制定およびそれに伴う「廃棄物処理法」の大幅改正（1992年）が行われた。

そして、近年になって、1997年（平成9年）不法投棄対策強化を目指して「廃棄物処理法」が改正され、今日に至っている^{3), 4)}。

廃棄物処理法でいう廃棄物とは、一般家庭の日常生活や事業から発生した汚物または不要物であって、固形状または液状のもの（放射性物質及びこれによって汚染されたものを除く）をいい、産業廃棄物と一般廃棄物に分類され、さらに、有害系の廃棄物の規制を特定するために、それぞれ特別管理産業廃棄物と特別管理一般廃棄物とを設けている。表1-1に有用物と不要物の分類を、表1-2に建設副産物の種類と廃棄物処理法の適用に関わる廃棄物の一覧表を示す。

（２）建設工事における発生土の分類

（ａ）「廃棄物処理法」による分類

表1-2に示すように、建設に係わる廃棄物の多くは建設副産物と呼ばれ、廃棄物処理法により多種多様にわたっているが、このうち建設工事における発生土に係わるものを整理すると図1-1のように分類される。

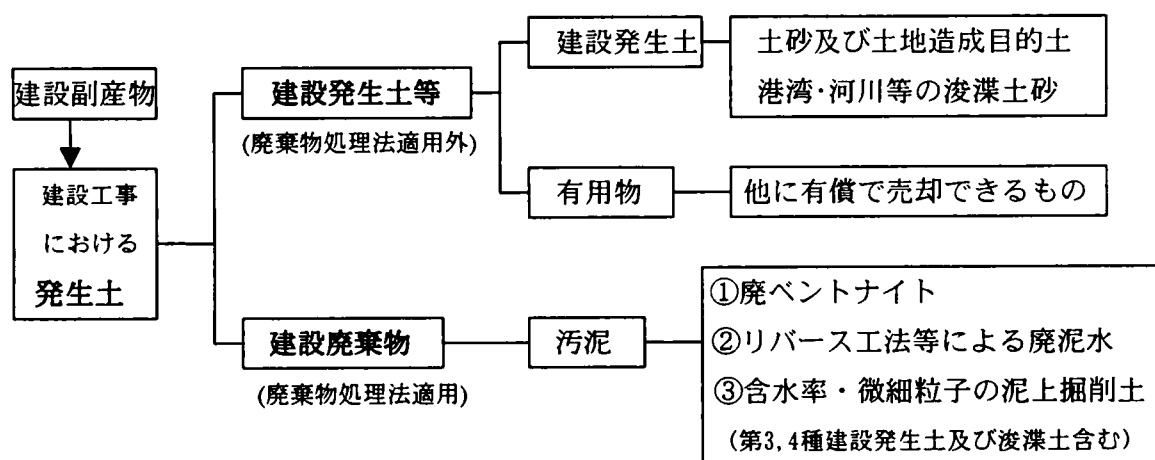


図1-1 廃棄物処分法による建設発生土の分類

中でも建設汚泥は、建築工事において排出した時点から、廃掃法に基づく産業廃棄物として適正処理が必要となる。もちろんこれらも適正な改良を行えば、建設資材としての利用も技術的には可能と考えられるが、この場合は廃棄物処理法に基づく再利用方策とすること、再利用後における環境条件等について周辺に影響を及ぼさないことが前提となる。ただこれらは、実際に再利用を行う場合に、前提とすべき取り決め等の仕組みが不明確なままであり、そのことが、建設汚泥の再利用化が進まない原因であることも多い。

表 1-2 建設副産物の種類と廃棄物処理法の適用に関わる廃棄物一覧表⁵⁾

建設発生土等

建設発生土

土砂及びもっぱら土地造成の目的となる土砂に準ずるもの

港湾、河川等の浚渫に伴って生ずる土砂、その他これに類するもの

有用物

他人に有償で売却できるもの

【廃棄物処理法の適用外】

建設副産物

特別管理一般廃棄物

特別有害一般廃棄物

(ダイオキシン、重金属等有害物を含むもの)

一般廃棄物

分類	建設現場から排出される一般廃棄物の具体的内容
廃棄物	型枠、足場材等 大工・建具工事等残材
紙くず	包装材、ダンボール、壁紙くず
繊維くず	廃ウェス、縄、ロープ類
もえがら	現場内焼却残さ物 (ウェス、ダンボール等)
その他	現場事務所、宿舍等の撤去に伴う各種廃材 (寝具、フロ、畳、日用雑貨品、設計図面、雑誌等)

建設廃棄物

分類	建設現場から排出される産業廃棄物の具体的内容
汚でい	① 廃ベントナイト汚水 ② リバース工法等に伴う廃汚水 ③ 含水率が高く粒子の微細な泥状の掘削土
廃油	① 重機等廃潤滑油、軽油、灯油、ガソリン等の使用残さ ② 防水アスファルト、アスファルト乳剤等の使用残さ
廃プラスチック	① 廃合成樹脂建材 ② 廃発泡スチロール等梱包材 ③ 廃タイヤ ④ 廃シート類
建設木くず	① 木造家屋解体材等
金属くず	① 鉄骨鉄筋くず ② 金属加工くず ③ 足場パイプや保安べいくず ④ 廃缶類
ガラスくず 陶磁器くず	① ガラスくず ② タイル衛生陶器くず ③ 耐火レンガくず
建設廃材	工作物の除去によって生じたコンクリートも破片、その他これに類する不要物 ① コンクリート破片 ② アスファルトコンクリート破片 ③ レンガ破片
ゴムくず	① 天然ゴムくず

産業廃棄物

特別管理産業廃棄物	特別有害産業廃棄物	廃石綿等 (飛散性アスベスト廃棄物)
-----------	-----------	-----------------------

本節では、この廃棄物処理法に基づく建設汚泥についての制度的位置づけを整理するとともに、再利用を行うための方策や、再利用時の留意事項などを整理し、建設汚泥の再利用に関する技術的展開の事例を紹介している。

(b) 建設省「建設発生土利用技術マニュアル」による分類¹⁾

建設工事によって排出される発生土は、建設省の「建設発生土利用技術マニュアル」により図1-2に示すように、まず建設副産物である「建設発生土」と廃棄物処理法上の汚泥に該当する「建設汚泥」に分類され、最終的に「第1種～4種建設発生土」（以降「土砂」または「残土」と称することがある）と「泥土」とに再分類される。

ここで建設汚泥とは、浚渫以外の建設工事等に伴って排出されるもののうち、標準ダンプトラックに山積みが出来ず、またその上を人が歩けない状態のもの（コーン指数がおおむね200 kN/m²以下または一軸圧縮強さが50kN/m²以下）を指すが、都市部における建設工事から排出される含水比の高い粘性土等は乱されており、そのままでは廃棄物処理法の観点から汚泥に分類されるものも出てくる。

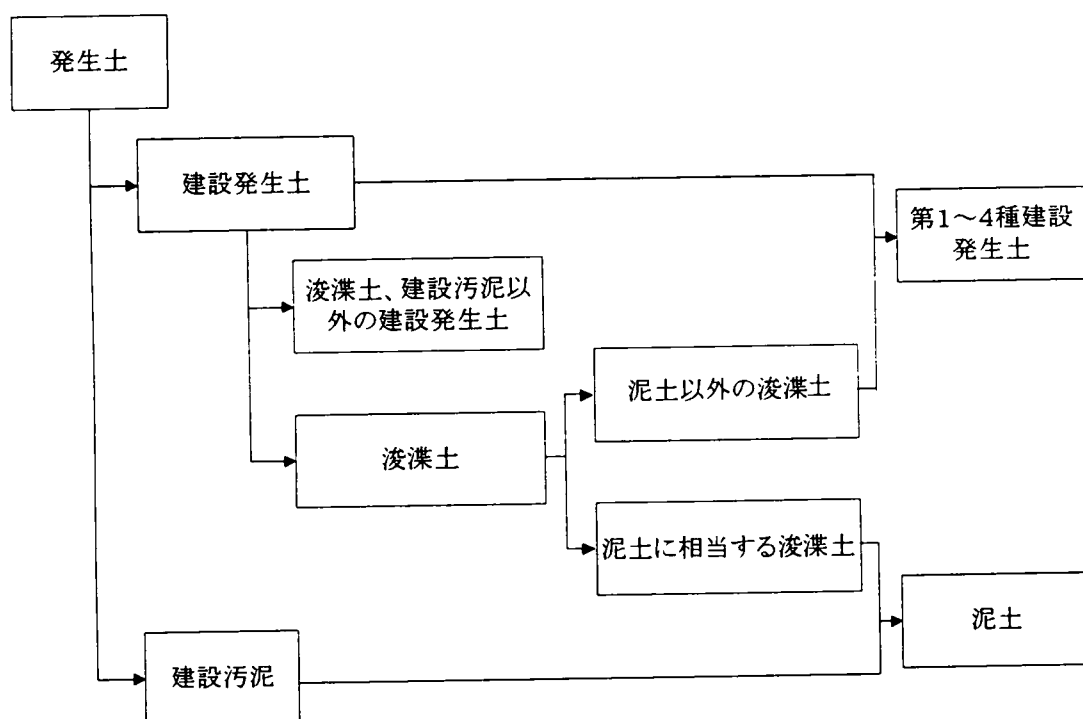


図1-2 建設発生土利用技術マニュアルによる発生土の構成図¹⁾

(3) 土砂と汚泥の判断基準

建設工事における発生土の分類と定義づけについたは、上にも示したように、法律における分類（図1-1）と建設省技術マニュアルによる分類（図1-2）との間に、若干視点につ

いての違いがあり、汚泥等の判断基準について混乱がみられたので、従来の判断基準と現時点のそれとを比較する形で触れておきたい。

(a) 従来の判断基準

建設汚泥については、残土と汚泥の発生現場での区分をどのような判別基準で行うのか不明確であったが、1990年（平成2年）5月に「建設廃棄物処理ガイドライン」⁴⁾により、土砂と汚泥の判別方法および中間処理後の取扱いを以下のように定め、各都道府県に対して厚生省より通知されている。

- ① 地下鉄の工事現場等から排出される含水率が高く、粒子の微細な泥状のものにあっては、無機性の汚泥として取り扱う。汚泥の例としては、場所打杭工法、泥水シールド工法などで生ずる廃泥水、下水道などにたまった泥状のもの等がある。一方、土砂(残土)には、砂、砂利、岩石を破碎したもの、粘土、シルト等があり、これらは、工事現場の切盛り等に使用されるので、汚物または不要物には該当しないため、廃棄物処理法に定める廃棄物に該当しない。
- ② 含水率の値のみでは、粒子の直径との関係があって一律に土砂と汚泥との区分をすることは困難である。含水率が85%以下という数字はあくまで埋立処分をするときの基準であって、廃棄物の定義のための数値ではない。なお、粒子の直径が74ミクロンを超える粒子を概ね95%以上含む掘削物にあっては、容易に水分を除去できるので、ずり分離等を行うことにより流動性を呈さなくなったものであって、かつ、生活環境の保全上支障のないものは土砂として扱うことができ、廃棄物処理法の対象となる廃棄物ではない。
- ③ 土砂は、そもそも一定の強度を有し埋戻し材料、路床材料、堤防、宅地造成用資材等として使用されるものである。しかしながら、泥状の状態であって流動性を呈する掘削物にあっては、そのままでは埋戻し材料等に使用もできず不要物として処理されなければならない。このように、占有者が自ら利用または他人に有償売却出来ず、不要になったものは、廃棄物処理法でいう産業廃棄物(汚泥)に該当する。
- ④ また、掘削物を標準仕様ダンプトラック等に積み込んだ時には「泥状の状態であって流動性を呈する」ものではない掘削物であっても、運搬中の振動や練り返しにより流動性を呈する掘削物もあるので、排出事業者は掘削現場の土質、掘削工法等を勘案して産業廃棄物(汚泥)として処分する必要があるものをあらかじめ定める等、処理計画を策定するとともに、掘削物が搬入先に到達した時の掘削物の性状を運転手または搬入先の管理者から聴取し、その性状に応じて搬入先を変更する等、産業廃棄物(汚泥)として必要な措置を講じなければならない。

(b) 判断基準の明確化

これまでも述べてきたように、建設汚泥は廃棄物処理法に基づき産業廃棄物として取扱う必要があるが、その処分には多大の費用を要することが多く、廃棄物処理法の対象とならない建設発生土と大きく異なる点である。ただ、建設発生土において第1種～第4種、及び建設汚泥(泥土)の判断は、現場搬出時にコーン指数により行なわれているのが実態であるが、

大量・多様な建設発生土をいかに分類するかには不明瞭な点が多いという問題点がある。このような混乱を避けるため、前述の「建設発生土利用技術マニュアル」でも、図1-2に示すように、建設発生土は浚渫土の一部を除いて第1種～第4種建設発生土として明確にし、極力建設汚泥という廃棄物用語を使わないよう配慮されたきた経緯がある⁵⁾。

そして、その後種々の技術開発の進展を経て、これらの問題を明確にし、建設発生土全般のさらなるリサイクルを図るために、産官学の専門家による研究が行われ、1999年11月「建設汚泥リサイクル指針」が建設省関係部署監修により刊行された⁶⁾。

その指針によると、産業廃棄物としての建設汚泥の定義は、それ以外の建設発生土や泥土との関係で図1-3に示すように、より明確になっている。また、建設汚泥の具体的な分類として表1-3を提示している。このような泥土と建設汚泥のより明確な位置づけは、建設汚泥の再利用はもちろんのこと、それ以外の建設発生土の有効利用にも大きく貢献することが期待される。

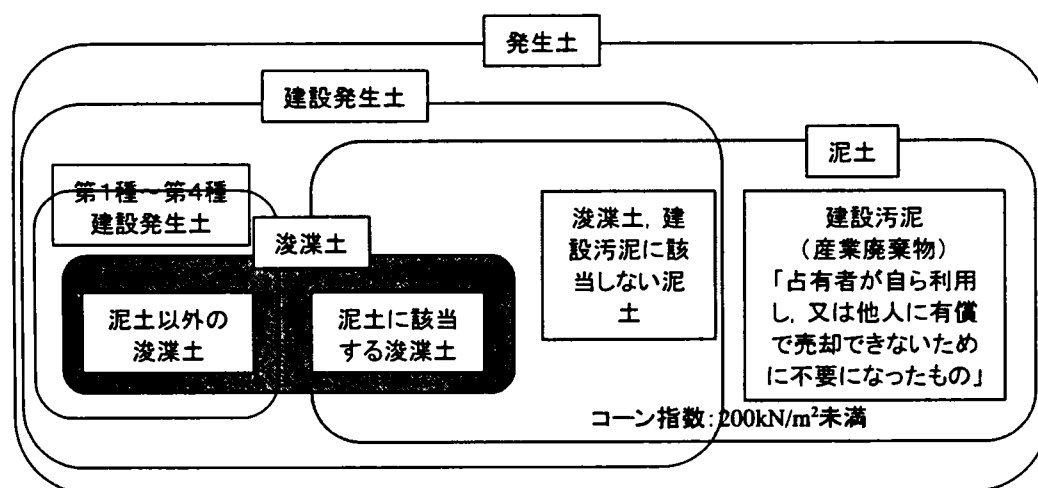


図1-3 建設汚泥リサイクル指針による発生土の構成図

表1-3 建設汚泥の分類

分 類		性 状	主な工法
非 自 硬 性 汚 泥	泥水状 汚泥	含水比が高く、機械式脱水により減量化が可能である。	・泥水シールド工法 ・連続地中壁工法 ・アースドリル工法
	泥土状 汚泥	含水比が比較的低く、機械式脱水が困難である。	・泥水シールド工法 ・アースドリル工法
自硬性汚泥		セメント等が混入しており、放置すれば固結する。	・高圧噴射攪拌工法 ・ソイルセメント壁工法（SMW工法）

1. 2. 2 建設汚泥の処理と有効利用

(1) 処理の法的位置づけ

(a) 廃棄物処理法における位置づけ

建設工事に伴って排出される掘削土砂(残土)およびコンクリートがらや汚泥等建設系廃棄物の法的関係は、廃棄物処理法の対象とはならない土砂(残土)と、その対象となる産業廃棄物に位置づけられる。このうち建設汚泥については産業廃棄物としての取扱いが必要となり、廃棄物処理法では次に示すように、元請建設会社に排出事業者責任があるとされている。

i) 自ら処理する場合

「廃棄物処理法」第10条では、産業廃棄物は排出事業者が自らの責任において適正に処理することと定められている。元請業者が建設廃棄物を自己処理する場合には、「リサイクル法」、「廃棄物処理法」等関係法令を遵守するとともに、工事現場から排出された廃棄物をどのように処理したかを十分に把握しておくことが必要である。

このように自己処理の場合にも「廃棄物処理法」に基づく処理基準、構造基準および維持管理基準が適用されるとともに、図1-3に該当する建設汚泥の処理施設の設置に当たっては、廃棄物処理法に基づく都道府県知事等の許可を受け、産業廃棄物処理責任者および技術管理者を置き、帳簿を備えなければならない。

ii) 処理業者に委託する場合

元請業者は、産業廃棄物処理業者に建設廃棄物の運搬、処分等の処理を委託する場合、廃棄物処理法に定める委託基準に従い妥当な委託費用をもって適正に委託契約を行い、契約に従ってこれを履行するとともに、適正な処理が行われるよう廃棄物処理業者を指導、監督しなければならない。

(b) リサイクル法における位置づけ

リサイクル法では、建設発生土(残土)等を指定副産物に指定し、再生資源として一般資材と同様に利用できるよう土質材料の目安を示すと同時に、建設業者および発注者に対し、建設発生土(残土)をその性質に応じて適正な用途に利用するよう努めることを関係者の責務としてあげている。

これに対し、建設汚泥については、発生量が多いにもかかわらず指定副産物に指定されていない。これは、建設汚泥の物理的及び化学的性状が様々であり、かつ、再利用に供するための目安等が未確立であることが原因と考えられる。

(2) 建設汚泥の再利用方策の検討

(a) 廃棄物処分法における再利用方策

廃棄物処理法でいうところの建設汚泥は、まえがきの表-1にも示したように、他の建設廃棄物に比べ減量化率および再生利用率が低い。また、廃棄物の最終処分場の確保が困難な状況にあり、さらに、ロンドン・ダンピング条約により1995年以降は海洋投棄が原則禁止される方向にあり、処分先の変更を余儀なくされるなどにより、再生利用の促進の必要性

が言われている。そのため、積極的に建設汚泥の発生抑制ならびに建設用資材、埋戻し用資材として再利用を促進していく必要がある。

ただ上述のように、建設汚泥についてはリサイクル法における指定副産物としての再利用方策の対象とはなっていないため、廃棄物処理法における再生利用が適用しうる制度ということになる。この場合、以下の3つの方策があり、状況に応じての使い分けがなされている。

- ① 廃棄物処理業者による中間処理と有価物としての再生資源化
- ② 排出事業者による有用物としての自ら利用
- ③ 再生利用制度による有用物化

このうち①は最も一般的な方法であるが、一部処理業者による寡占的な側面もあって、排出中間処理費用および有価物化費用のいずれもが必ずしも経済合理性に基づいてはいないことから、再生利用率が低く多くが最終処分場で処理されるという結果となっている。

これに対し、②や③の方策については、汚泥の排出と再生材料の購入という2つの面からコスト削減に繋がり、結果として最終処分量を減らせる効果を併せ持つことになり、建設コストや環境面において批判の対象となっている建設産業界においては、重要な課題となろう。

(b) 自ら利用

読んで字の如く、排出事業者が自らの目的にだけリサイクル利用するもので、例えばシールド汚泥を堅坑埋戻し等に再利用する場合等がこれに相当する。ただ、その用途や需給バランスは限られてくるので、これまで利用率は必ずしも大きくはなかったが、例えば指定されたダム現場で官民が協力して、ケースによってはコスト増になる可能性を含めて、100%再利用するという事例も出てきており、今後の展開が期待される。

(c) 再生利用制度の適用

いわゆる指定制度で、これらには一般指定、個別指定、大臣指定さらには大臣認定等がある。このうち、建設汚泥に適用されるのは、個別指定と大臣認定であるが、後者は極めて特殊なケースであり、これまでの適用例としては後述の高規格堤防の事例のみであるので、ここでは個別指定制度について触れておきたい。

個別指定制度は、いくつかの要件を満たす場合に再生利用者が「再生活用業者」として通常の廃棄物処理業の許可を必要とせず、「業」を営むことができるという制度であり、個別指定を受ける場合には、いずれも受入側の事業者が申請を行う必要がある。しかし、引き取りによる対価を求めない「無償での引き取り」であることを確認することの困難さや、使用材の品質管理の問題等もあり、また、他の山砂や残土と競合することなどの問題などから、個別指定を受けて建設汚泥が再利用された事例は、これまで必ずしも普及しているとは言えない状況であったが、近年になって、従来ならば建設汚泥として処分されていた高含水の泥土や脱水ケーキが個別指定によりソイルモルタルや粒状土として再利用されるケースも増えてきている。またリサイクルがキーワードの昨今、先述のように、建設汚泥リサイクル指針で産業廃棄物として建設汚泥に分類されるもの以外の泥土については、今後泥土のもつ土質・力学・化学特性を活用したリサイクルが益々図られると考えられる。

1. 2. 3 建設発生土の有効利用とソイルモルタル

(1) 建設発生土有効利用法の概要

詳細については本章 1. 3 で述べるが、建設発生土の有効利用方法について工学的に代表的なものを整理すると、図1-4の通りである。もちろんこれ以外の利用方法として、例えば、高品質な砂質土をサンドコンパクションパイルの中詰め砂として利用する工法等⁷⁾、様々な利用法が考えられるが、ここでは建設汚泥等主として低品質な粘性土を対象としているため深くは触れていない。

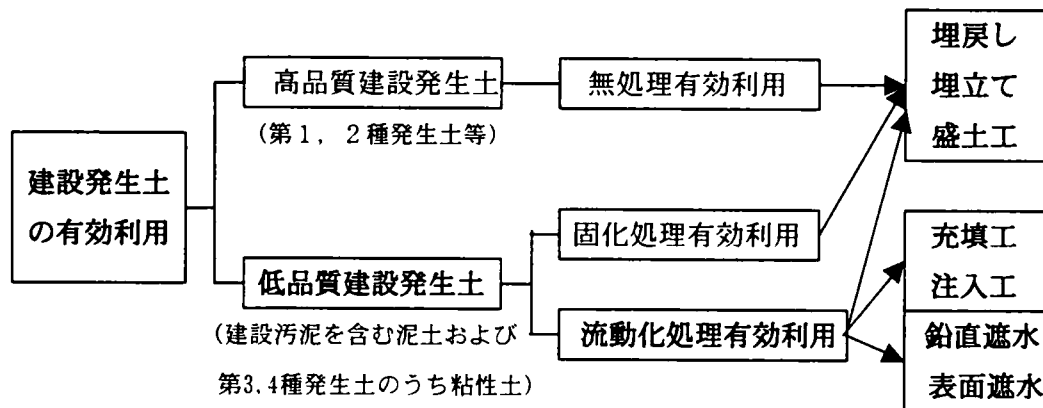


図1-4 建設発生土有効利用の概念

(2) ソイルモルタル工法とは

(a) 流動化処理工法とソイルモルタル工法との違い

流動化処理工法研究会により位置付けられている「流動化処理工法」⁸⁾ に対して、本論文の研究対象となる「ソイルモルタル工法」は、

- ① 建設発生土を流動化処理し有効利用する
- ② 「土」と「水」および「セメント」（またはそれに類する固化材）を主材とする
- ③ 必要により補助材もしくは添加剤を用いる

といった点で共通しており明確に分離することは難しいが、前者が、出来るだけ多くの建設発生土を再利用しようとするため、砂質土を中心とした適度な粒度構成をもつ「建設土砂等」を利用し、可能な限り高密度な流動化処理を行うことを前提としているのに対し、後者は「建設汚泥」をはじめ細粒粘性土分を主体とする低品質建設発生土（図1-4参照）を有効再利用するものであり、流動性を確保するために発生土の使用量は前者に比べ少なく、結果として含水量およびセメント量が多くなり、相対的に密度が小さいという相違がある。

(b) ソイルモルタルの特性

上記のように、ソイルモルタルは「土」と「水」および「セメント」の混合物であるが、建設発生土の主成分が粘性土で、粘土モルタルに代表されるように粘土鉱物が持つ界面化学特性を利用するものであり、いわゆる流動化処理土とは視点を異にしている。このため、粘

性土をそのまま利用するのではなく、粉砕し汚泥化するものであることから、いわゆる建設汚泥の有効利用に直結していくことになる。

このようなソイルモルタルを地盤材料として用いる場合に、原材料としての建設発生土の性状はとくに粘性土の質と量を中心に様々であり、また、ソイルモルタルの適用分野ごとに地盤基礎としての土構造物の重要度はそれぞれ異なることから、現場毎に下記の特性に関する基礎実験および現場実験を欠かすことが出来ない。

- ① 物理特性：密度、粘性（フロー値）、ブリージング
- ② 力学特性：強度（一軸、三軸）、変形（変形係数、圧密、ひびわれ）
- ③ 透水特性：透水性（遮水性）

1. 3 建設汚泥利用の現況

建設発生土のうちとくに建設汚泥は、まえがきの表－1にも示したように平成7年度の再利用率が14％と、有効利用が難しく、大部分が産業廃棄物として管理型処分場において廃棄処分されてきたのが、これまでの状況であった。これに対し「リサイクルプラン21」では、平成12年度に60％にまで有効利用率を上げることが目標としたが、平成10年度の実績では土木・建築合わせて約37％と、必ずしも十分な成果をあげるに至っていない⁹⁾。

本節では、この建設汚泥について、その発生状況や有効利用の現況および今後の課題等について整理しておきたい。

1. 3. 1 建設汚泥発生工事の概要

建設工事から発生する建設汚泥は、土工事いわゆる基礎工、土留工および掘削工事やシーールド工事などの工種から発生する。ここでは、工種別・工法別に発生汚泥の特性について整理し、かつその発生抑制ならびに再利用面からみた建設汚泥の性状や工法について触れておきたい。

(1) 基礎工および土留工と建設汚泥

(a) 基礎工に伴う汚泥

基礎工は、上部構造物の荷重を安全に支え、土圧、地震力などの外力に対して安全性を確保するために行うものであり、図1－5のような施工法がある。それらは、土質や地下水といった地盤条件、作業効率などの施工性、さらには騒音・振動等環境条件などにより決められる。

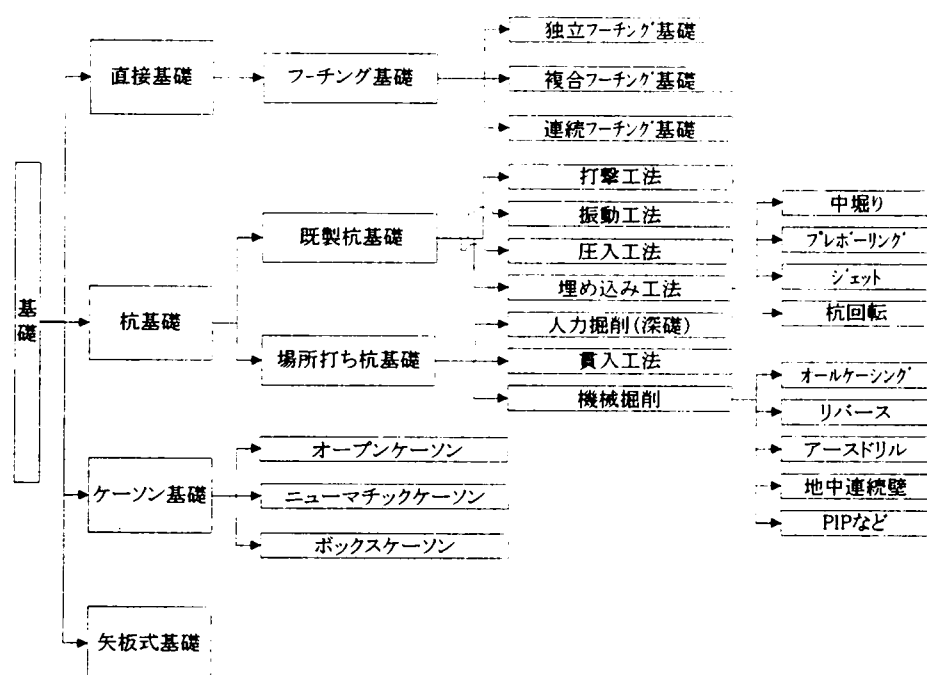


図 1－5 基礎施工法による基礎の分類

このうち、たとえば建築工事では直接基礎と杭基礎が主に採用されているが、建設汚泥は双方の施工に伴い発生しており、その性状は、直接基礎では含水率の高い掘削土が生じる可能性があり、また、杭基礎では工法により性状が異なる様々な建設汚泥が発生することになる。ここでは後者のうち、既製杭と場所打ち杭から発生する建設汚泥の特性を以下に整理した。

i) 既製杭工法と建設汚泥の特性

既製杭は、プレボーリング工法により建設汚泥が発生する。崩壊性の大きい地盤のときには掘削時に安定液を用いる場合があり、このとき廃泥水が発生する。また、掘削地点が地下水位より深く、かつ、土質がシルト・粘土層の場合流動性のある掘削土が排出されることがある。しかし、既製杭による建設汚泥の発生は、場所打ち杭と比較して少なく、掘削土は主に建設残土として搬出される。

ii) 場所打ち杭工法と建設汚泥の特性

場所打ち杭の掘削方法には、下記のように機械掘削によるオールケーシング工法(ベノト工法)、アースドリル工法、リバーサ(サーキュレーション)工法の3種類がある。

一般に、オールケーシング工法(例えばベノト工法)は杭径が小さい場合、アースドリル工法は作業スペースが充分とれない建築工事等の場合、さらにリバーササーキュレーション工法は規模が大きく、作業スペースも広くとれる場合に、それぞれ採用される。工法の概要および発生する建設汚泥の特性は次のようになる。

① オールケーシング工法

建設汚泥は、掘削中の湧水およびボーリング防止のための投入水により泥土化した残土が、その対象となるのみであり、その量は、泥水を用いるアースドリル・リバーサ両工法と比較して少なく、かつ、孔内泥水を使用しないため掘削土中の含水率は低く、ほとんどが建設残土として処分される。

② アースドリル工法

本工法による建設汚泥は、施工中に劣化したベントナイト廃液を処分するものおよび工事が終了して不要となったベントナイト液を処分する廃泥水と、ドリリングバケットでつかみとった掘削土砂の2種類がある。

掘削土は一般に安定液が少量混じった土砂となり、含水率はやや高くなる。そのため、現場で一次改良して搬出され、その後残土として埋立造成材に転用されるケースが大半であるが、廃棄物処理法では不適正処理とみなされる場合も多いので、適正な判断が必要となる。

一方、廃泥水については、コンクリート打設時に余剰となったベントナイト液を、現場内の他の杭施工時に繰り返して利用するため建設汚泥の量は全掘削土量の1/3程度と少ない。一般にベントナイト安定液はセメントの Ca^{++} イオンにより劣化するため、コンクリート天端から約5mの範囲の安定液が劣化安定液として排出される。

③ リバーサ工法

建設汚泥は、清水に地盤中の粘性土が混合してでてきた泥水の比重が大きくなり廃棄したもの、および水槽またはピットにおいて沈澱した土砂の２種類がある。循環泥水（通常はベントナイトを用いない自然泥水）とともに排土することから、建設汚泥となる掘削土砂の含水率は高く、全体としてオールケーシング、アースドリル両工法と比較した場合建設汚泥の量も多くなる。

(b) 土留め・締切工に伴う建設汚泥

土留め・締切工事は、盛土や切土の崩壊や滑落を防止するために行う工事であり、それらは、図1－6のような工法に分類できる。

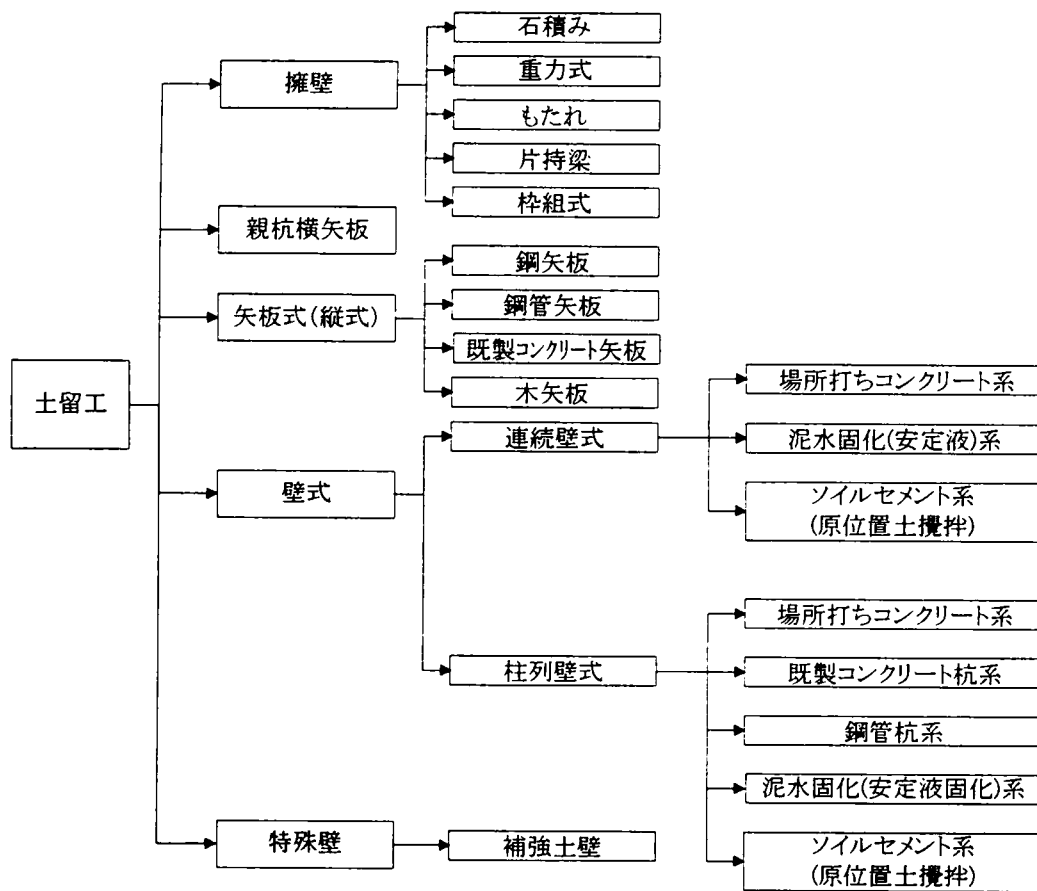


図 1－6 土留め・締切工の施工法別分類

ここでは、このうち壁式工法について図1－6に整理した代表的な工法の概要および建設汚泥の発生状況について述べる。

i) 地下連続壁工法

連続壁工法には、土留め壁による建築物の基礎囲い込みにより液状化防止も可能となるため、土質性状にかかわらず大規模工事等に用いられてきている。本工法では、杭のアースドリル工法と同様溝壁の安定を主目的として、安定液が必ず使用される。このため、掘削土砂

には安定液が付着あるいは混入し、また、コンクリート打設時の劣化安定液及び工事終了時の余剰安定液が廃液として出てくる。

① クラムシェルバケット式工法

建設汚泥は、安定液が付着した掘削土砂と、コンクリート打設時における劣化安定液、余剰安定液などの廃棄泥水の2種類がある。なお、泥水は正循環において分級されるが、ズリ分離されたものは一般に建設残土として排出されている。一方、建設汚泥は、掘削容量の20～25%程度が該当することになるため、土留工の中では排出量が比較的多くなる。

② リバース工法

回転ビッドなどにより孔(壁)底で地盤を切削しながら泥水とともに逆循環(リバース)で地上に搬出される。これがプラントで土砂と泥水に分級され、泥水は再利用、土砂は搬出处分されることになるが、その土砂の大部分は建設汚泥とみなされることになる。

③ 鋼製地中連続壁工法

この工法は、壁厚を薄くすることにより掘削面積の縮小が可能となるため、建設汚泥の発生抑制ができる。

ii) 柱列式地中連続壁

柱列式地中連続壁工法は、場所打ちモルタル杭や、ソイルセメント杭などを連続的に配置して、地下に柱列状の土留壁などを構築する工法をいう。

現在は、柱列式地中連続壁としては、オーガ削孔方式が主流となり、施工実績も飛躍的に増大している。このうち現在最も実績の多いものは、3連のオーガーを使用して削孔するソイルセメント柱列壁(SMW工法)である。

SMW工法の建設汚泥は、この工法が現状地盤の土を土留構造物材料として利用することから、余剰分の土砂およびセメントミルク等が対象となり、排出量が少ない。また、建設汚泥は、セメントミルクが固化材として混合されているため、副次的な改良効果がありハンドリングが良い。

(c) 発生工法別にみた建設汚泥再利用化の可能性

以上述べた基礎工および壁式土留工の代表的な工法について、それぞれの特徴と再利用化可能性を表1-4に整理した。これに示すように、掘削土は高含水土であり固化処理を行うことで再利用が可能である。ただし、アースドリル工法および地下連続壁工法に伴う掘削土にはベントナイト安定液等が含まれており、pHが高いことに注意が必要である。リバース工法における高含水土は、泥水分離後の排土であり固化材添加も多く必要となることから、大量に排出し、含水率も高い。

廃棄泥水には、ベントナイト等の安定液が混合しているものがほとんどで、土留工において大量に排出する。これらは、機械脱水後に、固化処理などを組み合わせた利用が考えられる。廃棄泥水は、上述のようにpHが高いものの高い粘性を有することから、ソイルモルタルや流動化処理土として再利用が可能である。

余剰セメントミルクは、ソイルセメント杭やSMW工法において排出するが、これらは、セメント系固化材混合の良質土として地盤改良材などへの利用も可能である。

このように工法により建設汚泥の性状が異なるものの、主に掘削土、廃棄泥水、余剰セメントミルクに分類でき、現場の条件に合わせてそれぞれの特性を活かした再利用方策を検討する必要がある。

表 1-4 工法別の建設汚泥の特徴と再利用化の可能性

			発生量 多少	掘削土砂 (泥土)	廃棄泥水	特 徴	再利用化可能性
基礎工	既製杭	プレボーリング工法	まれ	△	通常無	通常は残土として排土され、水分が多い時このみ泥状土が一部で発生。	含水率の高い掘削土であり、固化処理により利用可能であるが、建設汚泥の量は少ない。
		オールケーシング工法	まれ	△	通常無	〃	〃
	場所打ち杭	アースドリル工法	少量	○	◎掘削土の40%	含水率の高い掘削土とベントナイトを含む廃棄泥水の両方が排出する。掘削土の一部は建設残土となる。	廃棄泥水はベントナイト混合物であり粘性が高いため脱水が必要である。掘削土は固化処理後の利用可能。
		リバース工法	多量	◎	○	掘削土は、泥水調整後に高含水土が排出する。清水混合の泥水が多く、廃棄泥水はあまり出ない。	高含水土は固化処理後大量の利用が可能である。
		ソイルセメント合成鋼管杭工法	少量	△	○	余剰セメントミルクの一部が排出する。	セメント系固化材による調整等により、粘性と強度を活かした利用が可能。
土留工	地下連続壁	クラムシェルバケット工法	少量	○	◎掘削土の40%	含水率の高い掘削土とベントナイトを含む廃棄泥水が排出する。掘削土の一部は建設残土扱い。	廃棄泥水はベントナイト混合物であり粘性が高いため脱水後利用可能。高含水土は固化処理後の利用可能。
		リバース工法	多量	◎	○	泥水調整後の高含水土と、ベントナイトを含む廃棄泥水が排出する。	高含水土は固化処理後の利用可能。廃棄泥水もベントナイト混合物であり脱水後利用可能。
		鋼製地中連続壁工法	少量	○	○	〃	〃
	柱列連続壁	SMW工法	少量	△	○	余剰セメントミルクの一部が排出する。	セメント系固化材による調整等により粘性と強度を活かした利用が可能である。

(注)◎主な建設汚泥の対象 ○建設汚泥として発生するが少量であるもの △まれに発生するもの

以上述べてきたように、各掘削方法に伴い発生する建設汚泥は、安定液や泥水の使用の多寡等により、高含水比土または廃棄泥水などに分類できる。さらにSMW工法などでは、セメントミルク混合泥土が排出する。ここでは本論文の課題である再利用面からみた建設汚泥の性状の特性を以下に整理する。

i) 泥水利用による建設汚泥

場所打ち杭のアースドリル工法および地下連続壁によるクラムシェル方式、回転ビット方式などでは多量の泥水を使用することになるが、泥水工法に使用される泥水の目的は、掘削面・掘削壁の崩壊防止（地下水を抑える、土圧を支える、掘削面を長い間安定に保つ等）と循環泥水工法における掘削土砂の運搬である。この泥水には、ベントナイト系安定液とCMC系安定液（通称ポリマー安定液と呼ぶ）がある。最近ではアースドリル工法等の場所打ち杭においても、杭の品質向上を目的として、生コンのCaイオン等の影響による劣化の少ないCMC系安定液を使用するケースが増えてきている。

ii) 泥水による環境への影響

廃棄泥水は、コンクリート打設によって劣化された場合（通常、打設上端から5mまでは劣化するため廃棄する）、掘削土の混入により泥水比重が管理値を越えた場合、さらに工事終了時の場合において、それぞれ発生する。

一方、CMC系安定液を使用した場合には、廃棄泥水の発生量は少なくなるが、地盤への浸透による損失が大きいため地下水等環境への影響が懸念される。そのため、ポリアクリル系分散材などを使用して耐セメント性を向上させ、優れた造壁効果と低浸透性を併せ持つ新しい安定液の開発が行われてきた。

泥水掘削工法は、掘削孔の壁面などの崩壊を防止を目的とするだけでなく、掘削発生土の輸送媒体として泥水を利用する工法であり、泥水の使用方式により泥水非循環掘削方式と泥水循環掘削方式に分類できる。いずれもコンクリート打設時の余剰泥水や劣化泥水が廃棄泥水として排出され、これが代表的な建設汚泥の一つとなる。この泥水は、SS、pHが高く、このまま公共用水域や下水道に放流すれば、「水質汚濁防止法」や「下水道法」で定められている排水基準を超えるため、適正処理が必要となる。

iii) 掘削土および廃棄泥水の性状

安定液を含む掘削土の化学的性状をみると、とくにポリマー安定液を含む掘削物はCOD成分が高めとなる。また、廃棄泥水の性状をみると、泥水の状態でSS濃度が30%を超え、pHは8～12とアルカリ性を示す。

なお、工法別には、リバーシ工法では、建設汚泥が高含水比土を中心に比較的多く発生するが、通常はベントナイト等安定液を使用しないのでそれらの化学的性状は地盤土質と変わらない。これに対し、アースドリル工法、クラムシェル工法では、廃棄泥水に安定液が含まれたものが排出することになる。

iv) 建設汚泥の性状からみた再利用化可能性

基礎・土留め壁工事における建設汚泥の性状と再利用化可能性を表1-5に整理した。建設工事から排出する建設汚泥は、掘削土（高含水土）、廃棄泥水、余剰セメントミルクの3種類である。掘削土はベントナイトなどの安定液を含む高含水土であり、固化処理により品質調整を行うことで再利用が可能となる。特にリバーシ工法の場合には清水が用いられ、泥水としては地盤の粘性土分が利用されることが多いことから、含水率が高いことを除けば土質

性状等の相違はほとんどなく、埋戻し材や盛土材等に再利用が行える。また、廃棄泥水は、機械脱水を行った後に固化させることで再利用が可能となる。

本論文の主題でもある流動化処理による再利用工法が近年注目を浴びてきているが、これらの工法では、建設汚泥がベントナイトやCMC安定剤などを含有しており、またセメント系固化材が併用されることが多いことから、pHが高くなることに留意が必要である。

表 1-5 基礎・土留め壁工事における建設汚泥の性状と再利用の可能性

	性状と量	従来の処理方法	再利用化用途と可能性
掘削土	リバース工法に伴う泥水調整後（調整水槽）の高含水土と、アースドリル工法やクラムシェル工法などによりつかみ取られた安定液を含む高含水土が排出する。排出量は、リバース工法における掘削土全量となるがアースドリル工法では性状により建設残土となるものが多い。	石灰系、セメント系固化材を添加し、埋立処分されている。	地盤は主に互層となっているため掘削土の性状は安定化しないものの、基本的には土質識別分類に応じて埋戻材や盛土材などに再利用化が可能である。高分子系、石灰系、セメント系固化材を適量添加することで品質要件の確保が可能であり、再利用化の中心となるべきものである。
廃棄泥水	ベントナイトやCMC 安定液などが混合するためpHが高く粘性がある。廃棄泥水はコンクリート打設時、泥水調整時および工事終了時に劣化泥水として排出され、掘削量の2～3割が排出する。	中間処理業者に委託され、脱水などの処理が行われてきた。そのため、搬出は履蓋付きダンプ、またはタンクローリーなど、により行われてきた。	含水率が高いことから、機械脱水が必要である。脱水後は掘削土と同様に固化材添加により埋戻材、盛土材などに再利用化が可能である。また、ベントナイト等による流動性と粘性の特性を活かして流動化させた利用土としても技術研究が行われている
余剰セメントミルク	ソイルセメント杭や、SMW工法などにより排出する。SMWは土留工事の主流であるため多くの現場で排出する。施工量の4割程度が排出する。	管理型処分場に埋立処分されてきた。	セメントやベントナイトが混合されたセメントミルクであり、粘性と同時に固化強度を備えた利用土と考えられ、流動化させ固化時間を調整するなどの利用または地盤改良、造成材として有望である。（但し、高pHへの留意は必要）

（2）シールド工法と建設汚泥

土木分野に係わる建設技術のうち、もっとも進化を遂げてきたものの一つにシールド工法がある。その背景には、種々の厳しい施工環境や制約条件の増加、技術労働者不足や高齢化、さらには競争激化といった時代の趨勢等に対応する必要性があるが、それらは図1-7に示すように、様々な視点からの技術革新となって具現化している。そして、これらの技術の要因となっているのが、切羽の安定を泥水または泥土で保つという密閉型シールド技術の飛躍的な開発であることは周知の通りであるが、一方でそれらから発生する残土は、高含水で、

乱され塑性流動化したいわゆる建設汚泥に類するものが主体となり、その適正な処理が課題となってきた。ここでは、泥水シールドと泥土圧シールドについて、建設汚泥発生の仕組みと現況での再利用法について触れておきたい。

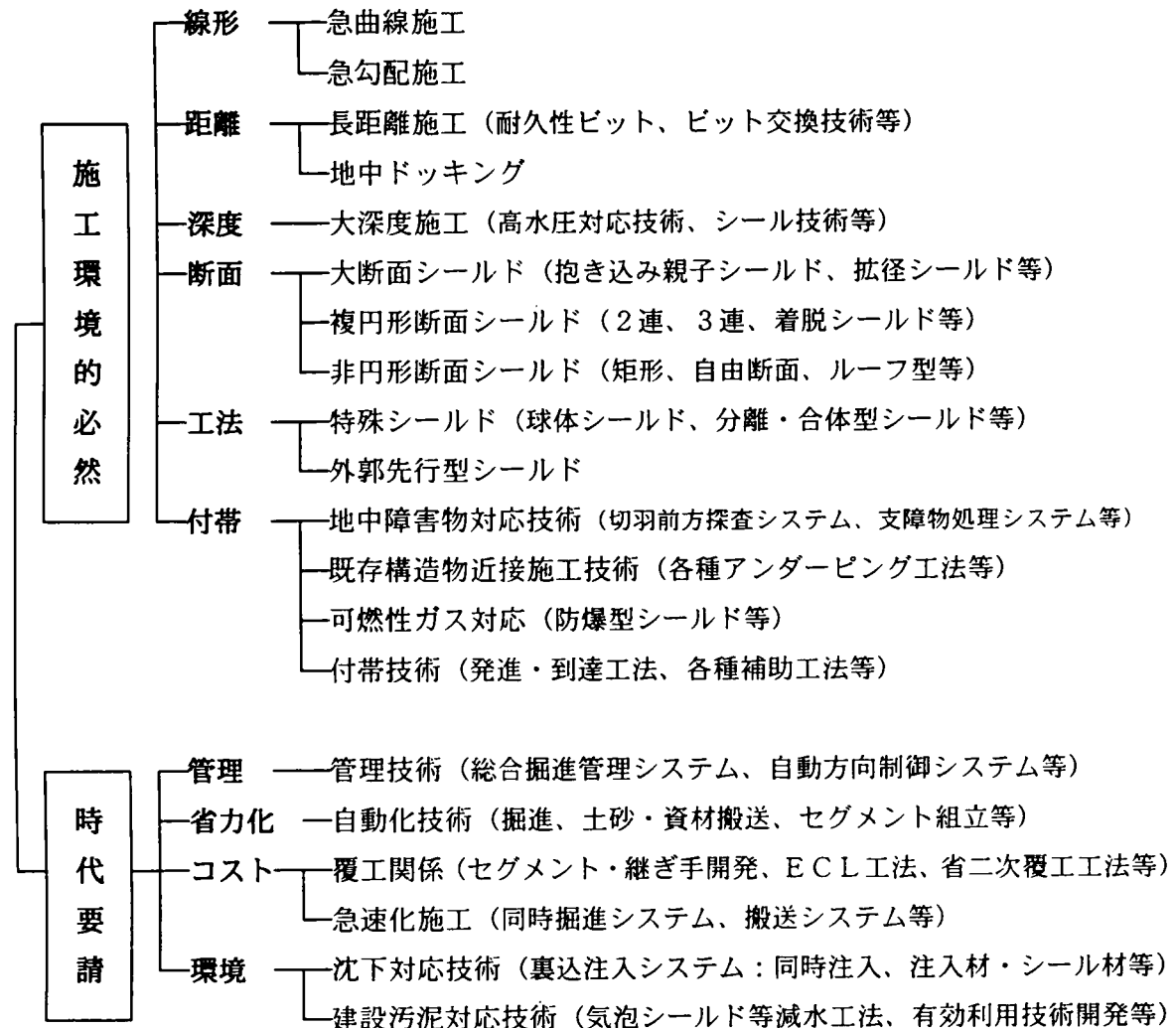


図1-7 シールド工法技術の革新状況¹⁰⁾

(a) 建設汚泥排出のメカニズム

i) 泥水シールド

泥水シールドとは、シールド機械のフード部（前面カッター部）とガーダー部（後部支承部）との間を隔壁で仕切り、この隔壁と切羽との間の空間（チャンバー）を加圧した泥水で満たして切羽の安定を図ると共に、掘削した土砂を泥水中に取り込み、排泥水として流体輸送により地上に搬出する工法である。

このようにして、地上に送られた排泥水は、図1-8に示すようなシステムで土砂と汚泥に分離される¹¹⁾。

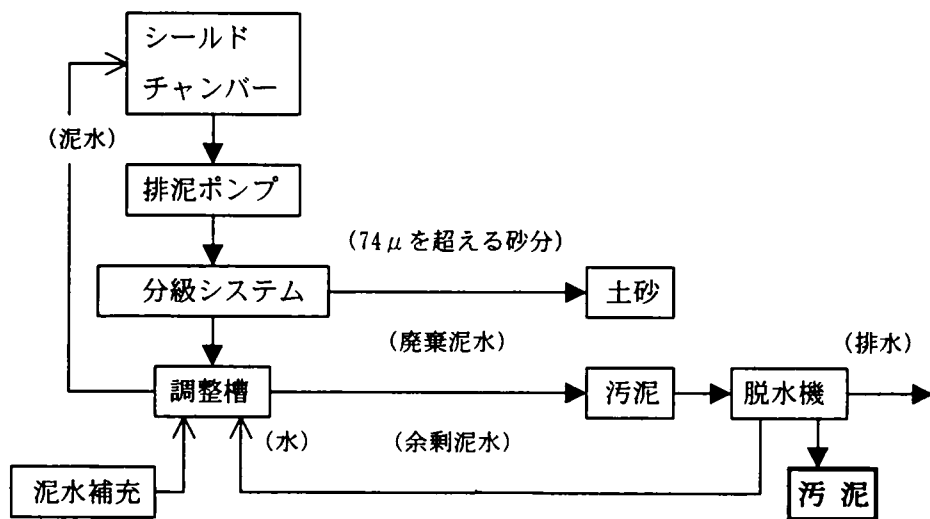


図1-8 泥水シールド掘削土搬出のフロー¹¹⁾

このように、泥水シールド工法では、汚泥の選別は極めて明確に行われるが、処理プラントは大規模となり平面的・立体的に大きなスペースを現場に必要とし、コスト的にも課題がある。

ii) 土圧式シールド

泥水シールドと同様隔壁を持った機械式シールドで、掘削した土砂をチャンバー内に充満させ、切羽の安定を図りながら掘進量に見合う土砂をスクリーコンベアなどで排出する工法で、土圧シールドと泥土圧シールドとの2通りの方式がある。前者がスクリーコンベアで取り込み土砂を調整しながらチャンバー内の圧力を保ち切羽の安定を図るものであるのに対し、後者は、掘削土に加泥材や気泡などの添加剤を加え強制攪拌させることによって、均質な泥土状として流動性を持たせ切羽の安定を図るものである。以上からも理解されるように、前者の土圧シールドは、排出土が含水量等地山の土砂と同じ状態であるため、汚泥として分類されることは少ないが、地下水の少ない粘性土地盤等採用範囲が限られるため、最近では後者の泥土圧シールドが採用されることが多い。

泥土圧シールドによって地上に排出された掘削土は、図1-9に示すようなシステムで土砂と汚泥とに分離される¹¹⁾。

この図から判るように土圧シールドの場合は、泥水シールドとは違って、汚泥か土砂かを判定するプロセスが重要となる。その判定の基準としては、排出土のコーン指数がおおむね200 kN/m²以下または一軸圧縮強さが50kN/m²以下の場合汚泥となるが、明らかに泥状を呈する場合は数値的な判定を待つまでもなく汚泥となる。土砂と汚泥とではその処理費用が数倍～10倍程度となることもあって、境界付近の判定は難しいものがある。

現時点において国土交通省では、土圧式シールドの排出土については、原則として産業廃棄物扱いとしている。

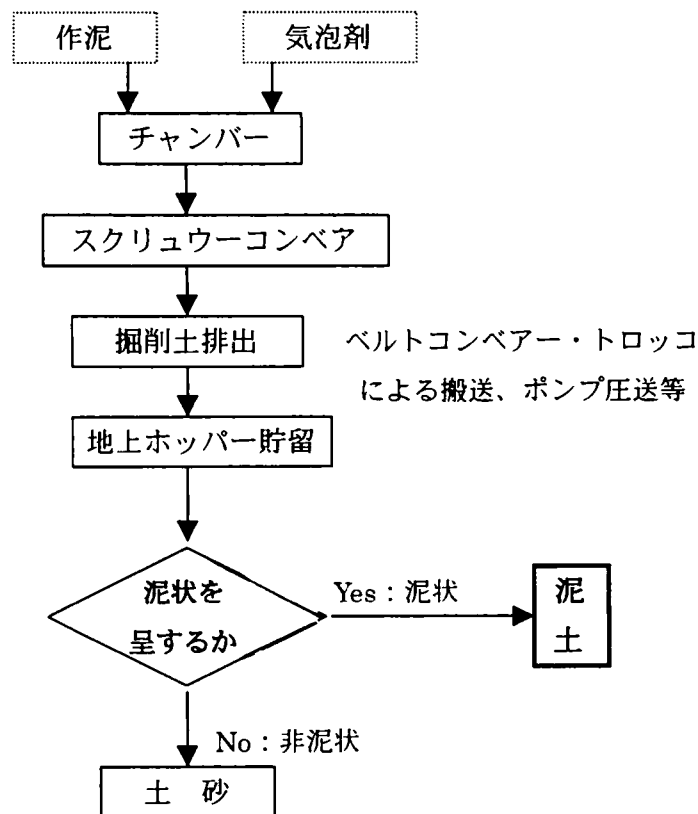


図 1－9 泥土圧シールド掘削土搬出のフロー ¹¹⁾

(b) 再利用の方法

シールド掘削に伴う建設汚泥の性状は、掘削する地盤の土質条件や掘削工法、掘削土搬出手段等によって異なる。薬液注入を行った地盤の掘削やチャンバーで気泡を混入する場合など、その性状を十分把握したうえで再利用の方法を検討しておく必要がある。

泥水シールドの場合は、後述の機械脱水方式に類して製品レベルでプラント処理されるが、土圧シールドの場合は、そのときどきの状況により性状は様々であるため、主として化学的改良処理がされることになる。第 2，3 章では、そのうちのセメント改良の一種であるソイルモルタルについて述べている。

1. 3. 2 建設汚泥の改良技術と有効利用事例

以上述べてきたように、基礎工事やシールド工事など建設工事により排出される高含水比掘削土、廃棄泥水、余剰セメントミルク、さらにはこれらが混合された建設汚泥等、それぞれの性状に対応した改良および再利用の可能性が理解されたが、ここでは具体的な技術やその再利用事例について紹介しておきたい。

(1) 改良技術の原理と特徴

軟弱な土や建設汚泥の大部分は表1-6に示すような物理的または化学的に改良されたのち搬出されている。

表 1-6 土質改良の種類と原理

改良方法		改良原理	特徴
物理的改良	水切り	重力水分離	砂質土系に適用
	天日乾燥	蒸発脱水	時間、広い敷地が必要
	機械脱水	脱水と高密度化	高性能機の開発あり
	良質土混合	含水率と粒度調整	大量の良質土が必要
化学的改良	セメント系改良	吸水、固化	強度発現が数日と早い
	石灰系改良	吸水、蒸発乾燥、固化、団粒化	生石灰は初期改良効果が早い
	高分子系改良	被覆、団粒化	強度発現小、固化材と併用。 pH影響がない

以下に各改良法の概要を述べる。

(a) 物理的改良

i) 仮置き水切り

掘削作業中および仮置き中に重力で水分離を行う方法である。礫から砂質土までの粗粒土の前処理に効果的であるが、粘性土には効果が少ない。再利用土として利用する場合には、天日乾燥と同様に一般に固化材などの添加が必要である。

ii) 天日乾燥

天日乾燥は自然条件に大きく左右される。改良効果は表面から20～30cm程度であり、全体での効果を上げるためには、攪拌やばっ気作業を行う必要がある。また、作業には長時間と広い敷地が必要である。

iii) 機械脱水

機械脱水方式の概要を表1-7に整理する。

このうち、建設汚泥の脱水には、加圧脱水式のフィルタプレス、遠心脱水式のスクリュウデカンタ、加圧絞り脱水式のベルトプレス、その他として回転ドラム等いくつかの方法がある。機械脱水を行う場合には、受け入れ土質の性状がスラリー状を呈した廃棄泥水が主たる対象となるものと考えられる。また、機械による脱水後の性状が、含水率が比較的高いこと、流動性を伴うものもあることなどから、さらに固化材添加による改良が必要である場合が多い。

高圧フィルタプレスは、従来の機械脱水に比べより広範囲のスラリーに対し高脱水、高減容化が可能であり、脱水後には第3種土質材料と比較しても十分に再利用可能な土質性状のケーキが得られる(含水率30%程度、一軸圧縮強度さ 180kN/m²程度)。しかし、この方式は、脱水可能な建設汚泥がスラリー状であり、かつ粘性を有するもの、粗粒成分の混入

のないものに限られる。

表 1-7 機械脱水方式の分類

種類	方式
真空ろ過	オリバフィルタ、ベルトフィルタ
加圧ろ過	フィルタプレス、高圧フィルタプレス
遠心ろ過	スクリュデカンタ
加圧絞りろ過	ベルトプレス、ロールプレス、ドラムプレス
その他	デハイドラム、ドラム型

脱水ケーキの強度は、十分に再利用可能であるものの、透水係数や雨水浸透後の性状（再流動性等）に不明な点があることから、工事後の管理が比較的容易な場所における利用が望ましい。なお、石灰系、セメント系などの固化材を助材として添加することで、再流動性を防止できる。

iv) 良質土混合

建設汚泥には一般に微細な土粒子（粘土分等）が多い。このような微粒子からなる泥状土に良質土を混合し、十分な改良を行うには大量の良質土が必要である。そのため、発生量が少ない場合には適用できるが、発生量が多い場合には不適であると考えられる。

(b) 化学的改良

i) セメント系改良

水和反応により土の水分を吸収すると同時に水和生成物によって土粒子の凝集、セメンテーションが起こり、土塊として固化する。セメント系改良の改良効果は比較的短時間で高強度に改良できるが、生石灰等のような蒸発脱水および土粒子自体の改良が行われない。そのため、一度固化したものを再掘削等で乱すと強度低下が起こる場合がある。なお、改良に当たっては土質により適性があり、試験混合等の調査が必要である。

通常5～20%のセメント系を添加混合して締固め、セメント系の接着硬化能力によってこれらの土を改良し、必要な支持力をもたせる。セメント系固化は、土塊の粉碎、固化剤の混合および締固めの難易が施工上のポイントとなり、均一に固化させるためには十分な混合が必要である。施工時は、粘性土の塊は適切に粉碎する必要があること、土の締め固めは含水量を最適値付近に調整して行うこと等に留意が必要である。

ii) 石灰系改良

石灰系改良材は、高含水比の土、軟弱土等の運搬・処理のための取扱いやすさを良くすることと、安定性と耐久性を維持または増大する目的で、高含水の土や軟弱土に石灰を3～20%程度の量を添加する。再利用に際しては、pHの問題、地下水等による溶け出しの問題に留意が必要である。石灰による改良は、一次的な脱水作用により短時間に効果を発揮することがあるため、軟弱地盤掘削のトラフィカビリティ改良のために用いられることも多い。

石灰系改良材(安定処理用石灰)としては、生石灰、消石灰、湿潤消石灰の3種類があるが、最近はこれらに種々の添加材を混入したものも多い。生石灰には吸水・発熱・膨張作用があり、土の含水率低下に極めて有効である。消石灰は土の粘土粒子と化学反応をして、土そのものを団粒化し良質土(パサパサした状態)に改良する。

施工時は、石灰と粘性土の混合の良否が効果に大きく影響すること、石灰と土との反応がかなり緩慢なため十分な養生期間が必要であること、特に生石灰は水和熱が大きく、消防法で危険物指定を受けていること等に留意が必要である。

iii) 高分子系固化材

現場内における固化処理は、従来、石灰、セメント系固化材の混合が主流であったが、改良後処理土の高pH化が避けられないことなどが課題としてあげられる。これらに対し、高分子系固化材による処理は、少量の添加で短時間に運搬性の良い処理土が得られる等の利点を有し、また、処理土のpHが中性(土砂のpHを変化させない)であり、植物の発芽、生育に影響しないので、植生が予定されている場所への埋立てや、客土、盛土材としての利用性も高い。なお、改良土の強度をコントロールする方法としては、石灰系固化材が併用されるケースもある。

(2) 建設汚泥利用の例

沖積低地に広がる都市部は軟弱な粘性土層の上に位置しており、工事種別(場所打ち杭、地中連続壁、泥水・土圧シールド等)、掘削方式(バケット系、オーガー系、リバース系)、地盤条件(砂質土系、粘性土系)、さらには添加材料(水、ベントナイト・ポリマー系安定液、セメントスラリー等)などにより、異なった土質性状の高含水の泥土(建設汚泥)が掘削に伴い発生する。土砂は良質な建設材料であることから場外搬出して再利用されることが多いが、泥土はその処理・処分が課題となる。

一般に発生土を搬出、再利用するためには、発生現場内で流動性を低下させコーン指数を 200 kN/m^2 以上、または一軸圧縮強さを 50 kN/m^2 以上にする中間処理が必要となるが、その土質改良方法としては、根切りによる掘削の場合には事前に地下水低下工により脱水が図られたり、バックホウ掘削時にセメント・石灰系改良材混合等による処理がされて、場外搬出されることが多い。また、余剰泥水や含水比が高い掘削土の場合、振動ふるいやサイクロン等により土砂分離がなされ減量化され脱水ケーキとして搬出されるが、未処理でタンクローリー車等の密閉車で中間処理場等に搬出されることも多い。このほかに、発生土がSMW廃泥のように自硬性のセメント混合土である場合には、仮置き・静置処理後、場外に搬出されることがある。最近では、本論文の主題のひとつであるが、強制脱水せずに発生土に水と固化材を添加して流動性のある低強度の埋戻し材として再利用される例も増えてきている。

このように発生土の処理としては、埋戻し材料や盛土材料などとして有効利用するか、処分地等に運搬するか of the いくつかの方法をとることになる。発生土の有効利用方法および分野

としては表1-8のような事例があり、盛土、埋戻し・充填材料、土留め壁、掘削泥水、路盤材料および植栽材料などの多くの分野での実用化が進められている。

以下では、これらのうちいくつかの発生土有効利用の事例を紹介するとともに、その特徴や課題についても述べる。

表1-8 有効利用事例の概要¹²⁾

処理方法	利用分野	処理手順
浚渫泥土の天日乾燥	水稲育苗土	浚渫土集積・貯蔵→乾燥→粉砕→肥料成分添加調整造粒→ふるい分け→製品
脱水ケーキの天日乾燥	かさ上げ盛土材	ポリマー、ベントナイトを含む泥水をフィルタープレスで強制脱水→現場敷地内で野積→天日乾燥→掘削土砂と同量混合→盛土
浚渫泥土・建設泥土の強制脱水	盛土材、埋戻し材、築設材	浚渫泥土・建設泥土混合→湿式分級→圧搾脱水して珪藻土添加→強制脱水→乾燥→盛土
浚渫泥土の強制脱水安定処理	スキー場グレンデの埋立材	浚渫泥土→沈殿消臭・凝集剤添加→スラリーを強制脱水→固化剤添加→固化→掘削→埋立
ダム工事での沈殿スラッジ土取場への良質土をサンドイッチ方式で混合	農地造成	沈殿スラッジ・脱水ケーキ→堆肥化肥料を混合→農地造成
道路掘削残土に良質土混合	路盤材、裏入れ材、築設材、宅地造成	ローム火山灰質土、火山灰粘土・砂質土・砂礫に砂質土・礫質土をサンドイッチ方式で盛土施工
泥土を袋詰め脱水	埋立材	道路掘削土→分級→細粒土に良質土混合→路盤材・盛土材・埋戻し材等
バックホウ・スタビライザーによる原位置安定処理	埋戻し	泥土・スラリーを大型土の中に充填→排水・圧密→埋立材
移動式プラント・ミキサー車等による安定処理	高規格堤防	トレンチ内に消石灰を投入→バックホウで混合→ダンプ運搬→埋戻し
	埋戻し	発生土にセメント系固結材添加混合→攪拌・締め・転圧
	流動化・充填	発生土、泥水を特殊キサー車等でセメントと混合
	流動化・埋戻し	発生土にセメント、水を特殊キサー車等でセメントと混合→流動状態で空隙充填・埋戻し
定置式プラントによる安定処理	埋戻し	強制練りミキサーで掘削土と固化剤混合→ポンプ圧送→埋戻し
	土留め壁材	リバーシ工法での掘削土(シルト質粘土・ローム)をミキサー投入→混合→ポンプ圧送→トレンチ管で土留め壁設置
	山留め壁材	リバーシ掘削土→泥水槽・モルタルプラントミキサーでセメントと混合→アジテーター→グラウトポンプで泥水モルタル注入
	盛土材	土圧ノールドからのシート排水→泥土ホッパー貯留→回転装置に固化剤投入混合→排出コンベアーで排出→30分の貯留後、搬出→盛土
	流動化・埋戻し	発生土にセメント、水を特殊キサーでセメントと混合→流動状態で空隙充填・埋戻し
	流動化・充填	
ジオテキスタイル利用	構造物裏入れ材	発生土→ジオテキスタイル敷設→発生土敷きならし→
	盛土土材	
泥水管理	掘削泥水	発生泥土→泥水調整→掘削泥水として再利用

(a) 盛土材料としての利用

盛土材料としての再利用の事例としては、高規格堤防(スーパー堤防)整備事業を挙げることができる。これは、面積16.8ha、盛土量130万m³、最大盛土高9.8m、平均盛土高6.3mで、江戸川堤防を整備する事業である¹³⁾。その堤防断面図を図1-10に示す。

スーパー堤防は、図中の破線で示した従来の堤防断面をスーパー堤防基本断面線までかさ上げして堤防強化を図るもので、盛土後に宅地利用などが想定されている。このため利用可能な発生土をある強度まで改良することが必要となる。

ここでは、建設省の同じ事務所内の綾瀬川放水路建設工事の発生土を用いているが、この発生土は、コーン指数 70kN/m^2 程度の高含水比の粘性土であるため、1年間ストックヤードに放置してコーン指数を平均 $100\sim 200\text{kN/m}^2$ 程度にし、その後、原位置でセメント系の固化材を添加・攪拌混合しトラフィカビリティーを確保している。

改良目標はコーン指数 400kN/m^2 以上、一軸圧縮強さ 100kN/m^2 以上、CBR値2%以上であり、セメント系固化材を 1m^3 当たり 60kg を添加した後のコーン指数は、 2000kN/m^2 程度まで改良されたことが確認されている。

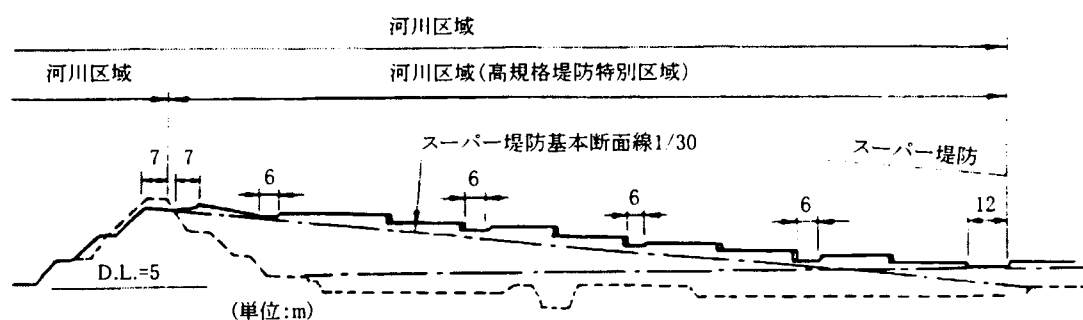


図 1-10 高規格堤防断面図 ¹³⁾

このほかにも、土圧シールドからの排出土を図1-11に示す現場プラントでセメント系固化材と混合し、約30分の貯留後ダンプトラックで搬出して、受入先で高さ1.5mの盛土を行っている例がある ¹⁴⁾。ここでは、含水比60~70%の排出土に約 33kg/m^3 のセメント系固化材を加え、搬出時にコーン指数で 100kN/m^2 以上、24時間後に 400kN/m^2 以上の目標値が定められ、2か月後にCBR値8~16%が確認されている。

さらに含水比70~90%、一軸圧縮強さ $30\sim 150\text{kN/m}^2$ の地中連続壁からの脱水ケーキを天日乾燥させてダンプトラックで搬出、3か月の天日乾燥により含水比を約40~60%まで低下させて、厚さ1.5mのかさ上げ盛土材料として利用している例もある。

高規格堤防や盛土では、発生土を大量に利用できるため、改良等の工夫により可能な限り他工区の発生土を用いることが求められる。このことから中低強度の改良土としての合理的な改良目標の規準と、その基準を満たす効率的・経済的な改良工法が今後も研究開発されることになろう。

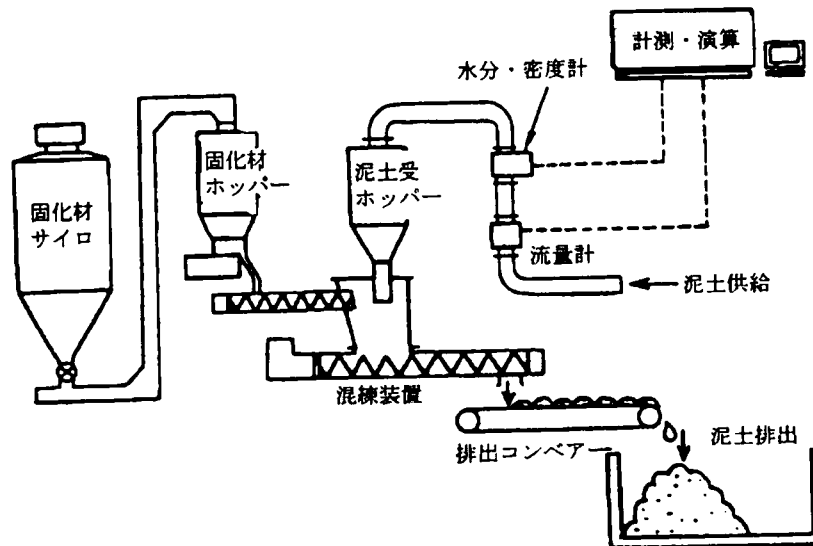


図1-11 盛土材としての改良プラントの例¹⁴⁾

(b) 埋戻し材料としての利用

埋戻し材料としては、分級し細粒分を除いた砂分を利用する場合、石灰またはセメントで安定処理した後それらを粉砕し砂礫状態で利用する場合、さらには水および石灰またはセメントを混合して流動状態でポンプ圧送して利用する場合に大別される。

一般的には、前2者のように分級・固化処理された泥土を土質材料として再利用するものがほとんどであるが、3つ目の方法のように現場内で埋戻し材料として再利用することは、近年になって流動化処理工として一般に知られてきており、泥水式シールド掘進時の余剰泥水および一次処理土(砂および礫)を開削工事での埋戻し材として再利用を図っている例がある^{15), 16)}。

このシールド発生土の再利用システムは、シールド余剰泥水にセメント系固化材を加えて混練し、流動状態のままポンプ圧送して埋戻し材として利用するもので、従来の山砂による埋め戻しと比べて締固めが不要で省力化が図れる他、小さな空隙にも充填できるので狭溢空間での転圧作業がなくなり、安全性が向上するなど施工上の特長がある。

試験で用いられた土質材料の粒度組成の例を図1-12、余剰泥水および濃縮泥水の性状の例を表1-9に示す。余剰泥水を分級・濃縮した泥水比重については、泥水処理土の湿潤密度が原地盤である関東ロームの湿潤密度とほぼ同じにすることを考慮して1.40程度に設定されている。

泥水比重1.40の場合、高炉セメントB種の添加量と泥水処理土の一軸圧縮強さの関係が図1-13のように得られている。将来掘削することを考えて、材齢28日の目標強度 300kN/m^2 を満たす固化材添加量を 55kg/m^3 としている。この泥水処理土の物性値は表1-10の結果に示す通りである。

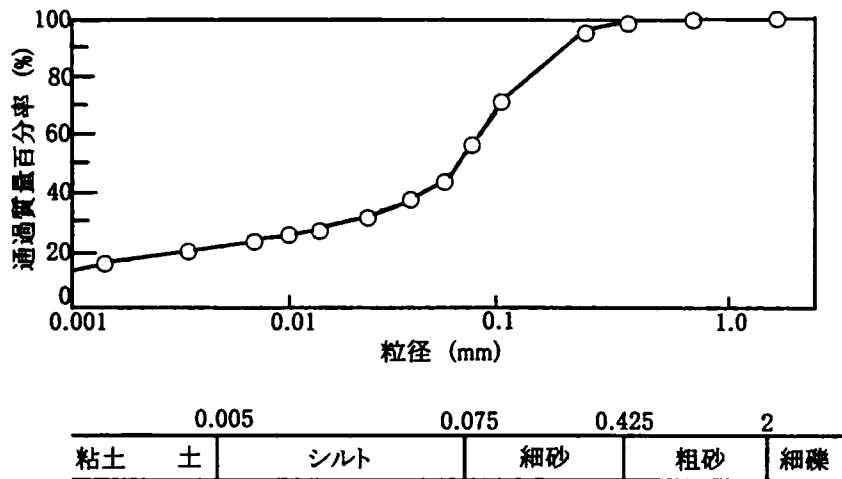


図 1-12 土質材料の粒度組成¹⁵⁾

表 1-9 泥水性状の例¹⁵⁾

泥水種類		余剰泥水	濃縮泥水
比 重		1.22	1.40
含水比 (%)		239	117
粒 度 (%)	砂 分	7	42
	シルト分	45	36
	粘土分	48	22
P ロート値 (秒)		8.9	9.1
ブリージング率 (%)		7.4	8.8

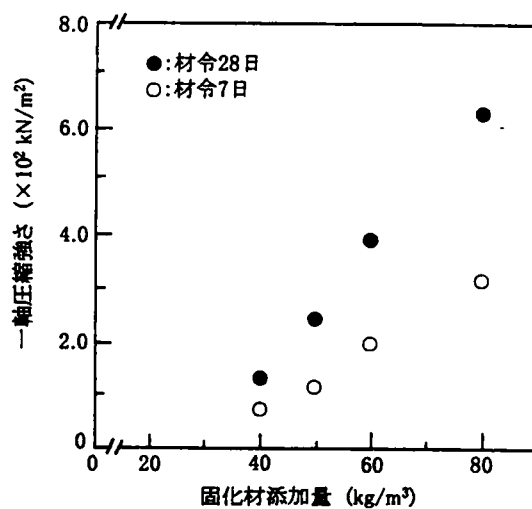


図 1-13 固化材添加量と一軸圧縮強さの関係¹⁵⁾

表 1-10 泥水処理土の性状¹⁵⁾

比 重		1.43
ブリージング率（％）		0.0
P ロート（秒）		10以上
スランプフロー値（cm）		64.0
一軸圧縮強さ （kN/m ² ）	材令 3日	0.08
	7日	0.16
	28日	0.33
透水係数（cm/sec）		1.54×10^{-5}
圧密降伏応力（kN/m ² ）		240
圧縮指数		1.76
体積圧縮指数（cm ² /kgf）		4.28×10^{-2}
圧密係数（cm ² /day）		3.64×10^3

施工システムの概念図を図 1-14 に示す。泥水の濃縮は小型サイクロンを、固化材の混練はフロージェットミキサーを、それぞれ用いて改良を行った結果、処理土は目標強度を満たす値が得られることが報告されている。また、この試験施工の結果から以下のような施工規準を提案している。

- ① 打設時の処理土のブリージング率は1%以下、スランプフロー値は60cm以上とする。
- ② 打設1ブロックは、層厚50cm以下、面積300m²以下とし、土のうでブロックの間仕切を行う。
- ③ 雨水による流出を避けるため打設1ブロックごとにシートで屋根を取り付け、1週間の養生を行う。
- ④ 1ブロック打設後1週間経過した時点で、一軸圧縮強さが150±50kN/m²以内であれば、新たに上層打設することができる。
- ⑤ 1ブロック打設後4週間経過した時点で、一軸圧縮強さが300±100 kN/m²以内であることを確認する。

(c) 充填材料としての利用

充填材としての要求性能は施工方法・条件により異なるが、その項目としては流動性、ブリージングおよび硬化後の強度などがある。充填材としては、地中連続壁工事の掘削土を場所打ち杭頭充填材やインバート材としての施工事例がある。

ここに紹介するのは地下鉄軌道の導床下部工で、現在用いられている貧配合の生コンクリートに代えて、泥水加圧式シールドの発生土処理を行う後方プラント基地で一次処理土と余剰泥水に固化材を加えミキサーで混練攪拌し、シールド掘進に合わせて流動状態でポンプ圧送によりトンネルのインバート部を築造するものである^{17),18)}。

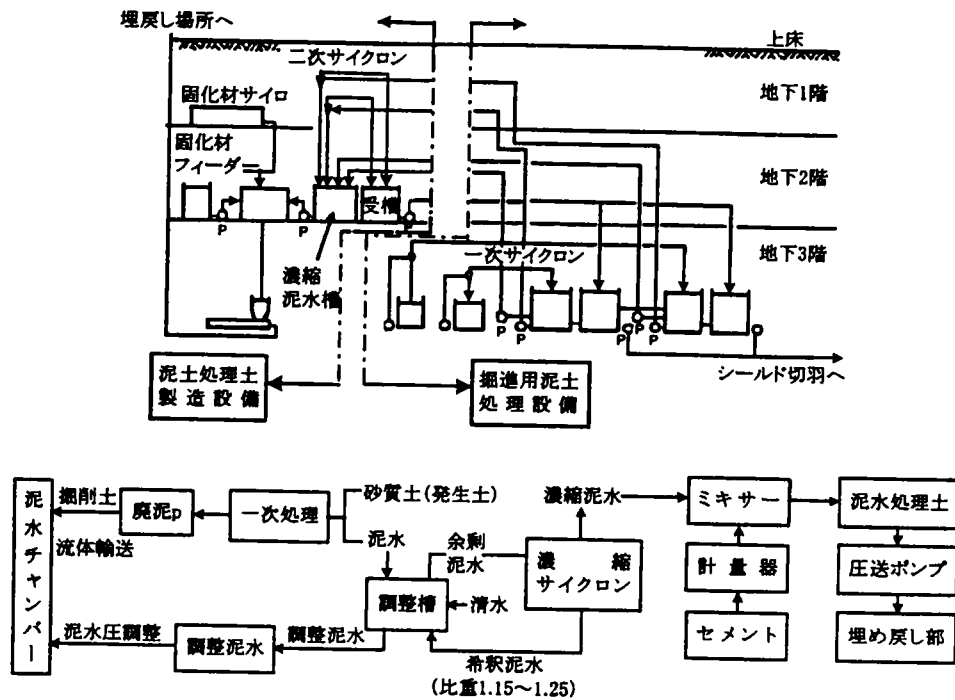


図 1-14 定置型プラントによる流動化処理土施工システム例 ¹⁵⁾

従来シールドトンネルインバート部はコンクリート構造であり、その上部の軌道を通じての列車荷重を長距離にわたり無補修で支持しなければならない。その具備すべき要件として、

- ① 不同沈下や不均一な体積変化を起こさない
- ② 列車走行時の荷重・繰返し応力、振動に耐えられること(インバート反力で620 kN/m²)
- ③ 満水状態において劣化を生じないこと
- ④ 化学物性に対し耐力を有すること
- ⑤ トンネル内の温度、湿度等環境変化による亀裂、劣化、強度低下がないこと
- ⑥ 道床コンクリートとの一体性があること
- ⑦ トンネルの振動防止上からある程度の重量を有すること
- ⑧ 製造プラントから打設地点までのポンプ圧送を考慮して適当な流動性をもつこと

などが必要である。

この要件を満たす泥水式シールド発生土によるインバート築造システム概念図は、図1-15のように示される。

シールド発生土は地質や分級施設の特性によって粒度特性が異なるため、配合設計および試験練りを数多く行い、目標強度を確保するとともに、打設時に必要なワーカビリティを有し、スランプロスが少ない材料として施工されている。打設後の状況はクラックや体積変化もなく、強度も十分確保でき、インバート材として十分な性能を有することが確認されている。

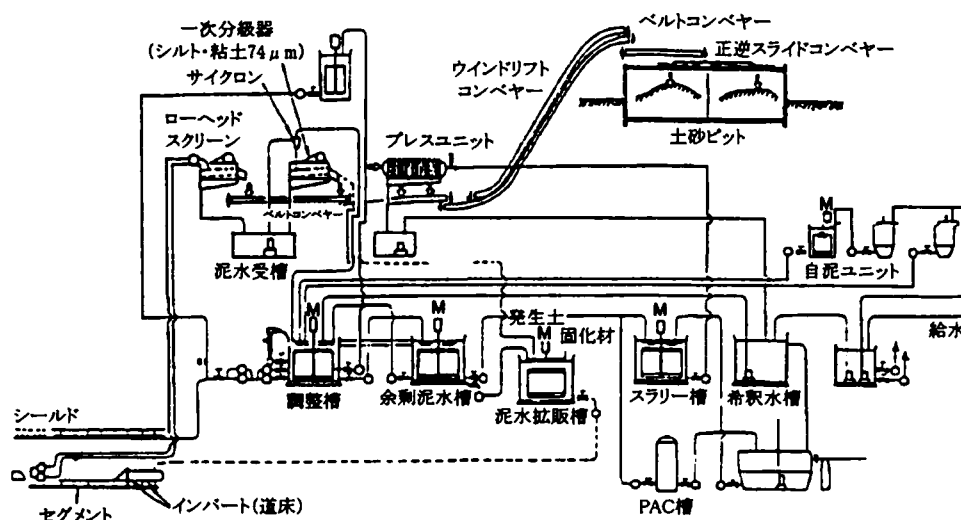


図 1-15 泥水シールド発生土によるインバート築造システム¹⁷⁾

このほかにも発生土を充填材としている例としては、埋設管周辺充填や空洞充填などへの利用や、軽量土の機能を持たせた充填材としての利用が行われている。

(d) 掘削泥水・泥土としての利用

泥水掘削による連続地中壁工法、場所打ち杭工法あるいは泥水シールド工法で発生した泥土を再び掘削泥水として利用することがある。その際掘削に必要な性能を有する泥水・泥土とするために、砂の除去、比重調整などの品質調整がなされる。安定液の品質としては、地中連続壁協会では表1-11の基準を推奨している¹⁹⁾。ここで比重は掘削溝壁の安定性向上のため1.0以上のものが必要であり、コンクリートとの置換やポンプ圧送性の低下を防ぐためには上限を1.20程度とする場合が多い。粘性は粗粒地盤の崩壊防止や逸泥防止には高い値が求められるのに対して、混入する土砂の分離には低い粘性が望ましい。

表 1-11 安定液管理基準¹⁹⁾

管理項目	掘削時	スライム処理時
ろ水量(cc)	30以下	
粘性(秒)	20～36	20～36
比重	1.01～1.20	1.01～1.10
pH	7～11.5	7～11.5
砂分率		1以下

一般に掘削泥水・泥土としての再利用は同一現場内でなされているが、地中連続壁工法での泥水をアースドリル工法などの杭工法で利用する施工事例や、同一工法を採用する近接する現場間での施工事例も見られる。ただしこの場合、掘削泥水(安定液)の品質管理、品質調整などを厳密に行うことが必要である。

掘削泥水の現場間利用の例としては、基礎工事現場からの泥水を図1-16のように処理再生施設で品質調整し、用途にあった品質にして別の現場に供給しているものがある²⁰⁾。この掘削泥水の再利用先は主に泥水シールド工法の現場であり、泥水に粘土やCMCを添加し初期掘進用として比重1.30前後、ファンネル粘度35-40秒、砂分率18%以下に調整して供給される。この場合運搬は水が大半の泥水であり、遠距離運搬では不経済となることからその運搬距離は50km以内が大半である。

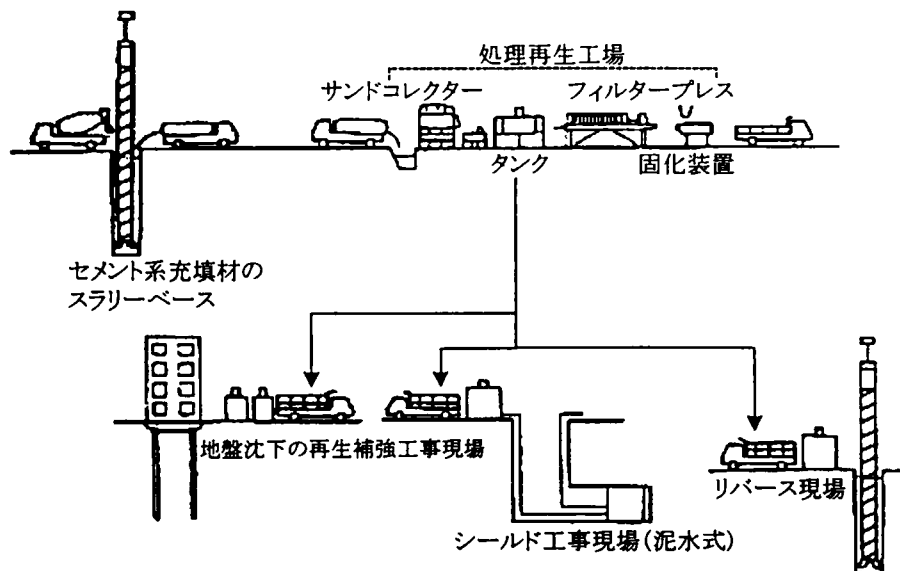


図 1-16 泥水再生とシールド工事への利用²⁰⁾

いまひとつの例として、図1-17にアースドリル工法による場所打ち杭工事から発生する泥水を、別の場所打ち杭工事現場で再利用している施工事例を示す²¹⁾。このような再利用により、再生安定液に要したベントナイト、ポリマーなどの材料は新材料を用いた掘削安定液の場合に比べて約半分の量となったことが報告されている。また、サイクロンで除去した砂は埋戻し土として有効利用している。

今後このような泥水としての有効利用は増える傾向にあるが、泥水の品質管理方法や搬出・搬入量の情報の適切な管理方法の確立が課題として残っている。

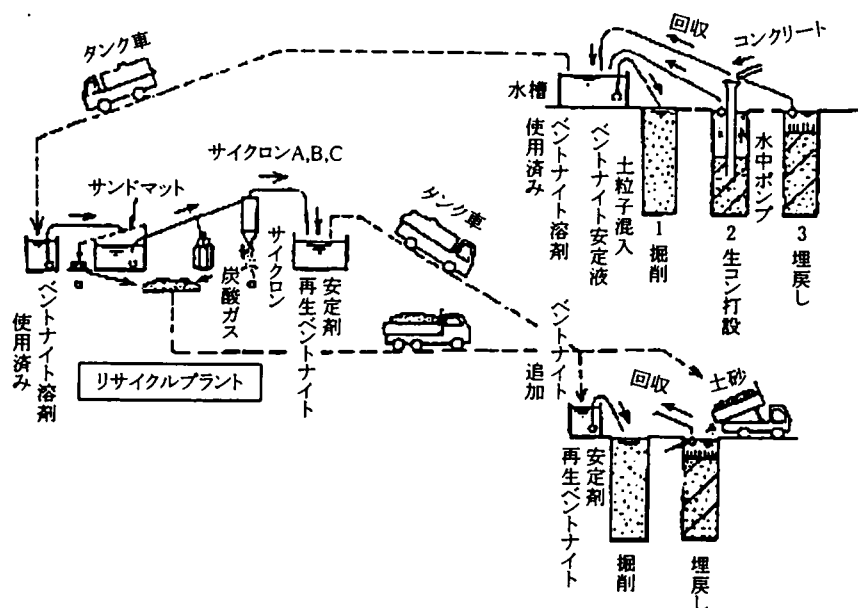


図1-17 杭工事間のリサイクル例²¹⁾

1.3.3 建設汚泥の有効利用に関する課題

建設工事から発生する廃棄物はその量が多く、大都市周辺では埋立処分場の確保が困難な場合が多いことから、これまでも度々述べてきたように、発生量の抑制と発生した廃棄物を有効利用することにより最終的な処分量を減じなければならない。

建設廃棄物を減量化・再資源化するためには、

- ① 設計・施工法を検討して発生量を可能な限り少なくする。
- ② やむを得ず発生するものについては、有効利用により廃棄物処分するものを減らす。
- ③ 有効利用できないものについては、埋立て処分する量を極力減らす工夫をする。

等の工夫をする必要がある。ここでは、②の有効利用について今後の課題等について触れておきたい。

(1) 土質改良プラントと需給問題

土質材料として再利用する場合、これまでも述べてきたように

- ① 特別の処理を加えず直接利用する方法
- ② 土質改良や施工上の工夫等の処理を行って利用する方法

がある。建設発生土の性状は多種・多様である。建設発生土のうち砂質土等は特別な処理を行わなくても再利用が可能であるため、主として場内で再利用されることも多いが、より一般的には、建設発生土に対し各種の土質改良や施工上の工夫によりその広域的な再利用を図ることが必要となる。

このように建設発生土の広域的・効率的な利用を図るためには、発生側と利用側とが情報を共有して、発生土の性状を把握し再利用の工夫が検討することになるが、土質改良や施工上の工夫は、

- ① 発生側で行う場合
- ② 土質改良プラントやストックヤードなどの中間処理プラントで行う場合
- ③ 利用側で行う場合

の3通りに分けられる。工期や土工量の調整を勘案すれば、土質改良プラントやストックヤードにおいて土質改良を行い需要に対応することが望ましいといわれている。図1-18にその概念図を示す。

最近、このようなストックヤードを保有する土質改良を目的とした再資源化施設が設立されているが、実際の運用に際して以下のような問題が浮かび上がってきている。

- ① 発生場所、利用場所からプラントまでの距離が遠い。
- ② 発生土の性状は多種・多様であるため、土質改良プラントで改良したとしても、目的とする土質材料の条件を満たすような材料管理ができるかの品質保証上の課題が残る。
- ③ 発生現場内、または近接現場間でのリサイクル方法を確立しない限りコスト低減につながらない。
- ④ 多様な発生土に対応できる、またさまざまな仕様を満足できる再生材料を供給できる総合的な改良プラント施設の立地が進んでいないのと同時に、簡易な移動プラントが開発されていないという現実がある。

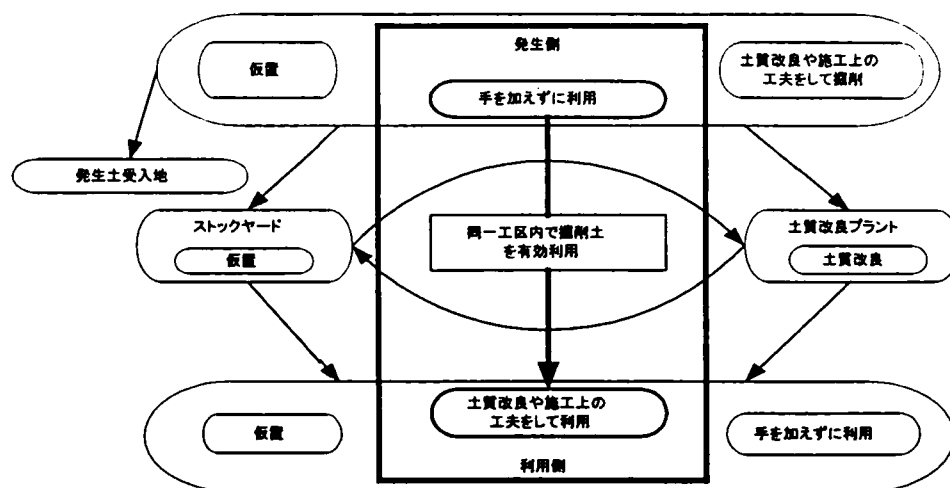


図 1-18 再生土の需給関係と有効利用の概念図³⁾

(2) 建設発生土の利用検討手順

図1-19にその手順を示すように、発生土利用にあたっては、発生側・利用側で、品質管理や搬入条件等を十分に検討、協議することが必要となる。とくに土質改良などを行う場合

は、建設発生土の性状のバラツキを考慮して、利用場所においてサンプル採取・検査、および施工後の試料採取などにより品質管理を行うことが必要である。

発生土の利用促進のためには、発生側、利用側において、各々以下のような事項に努めることが重要となる。

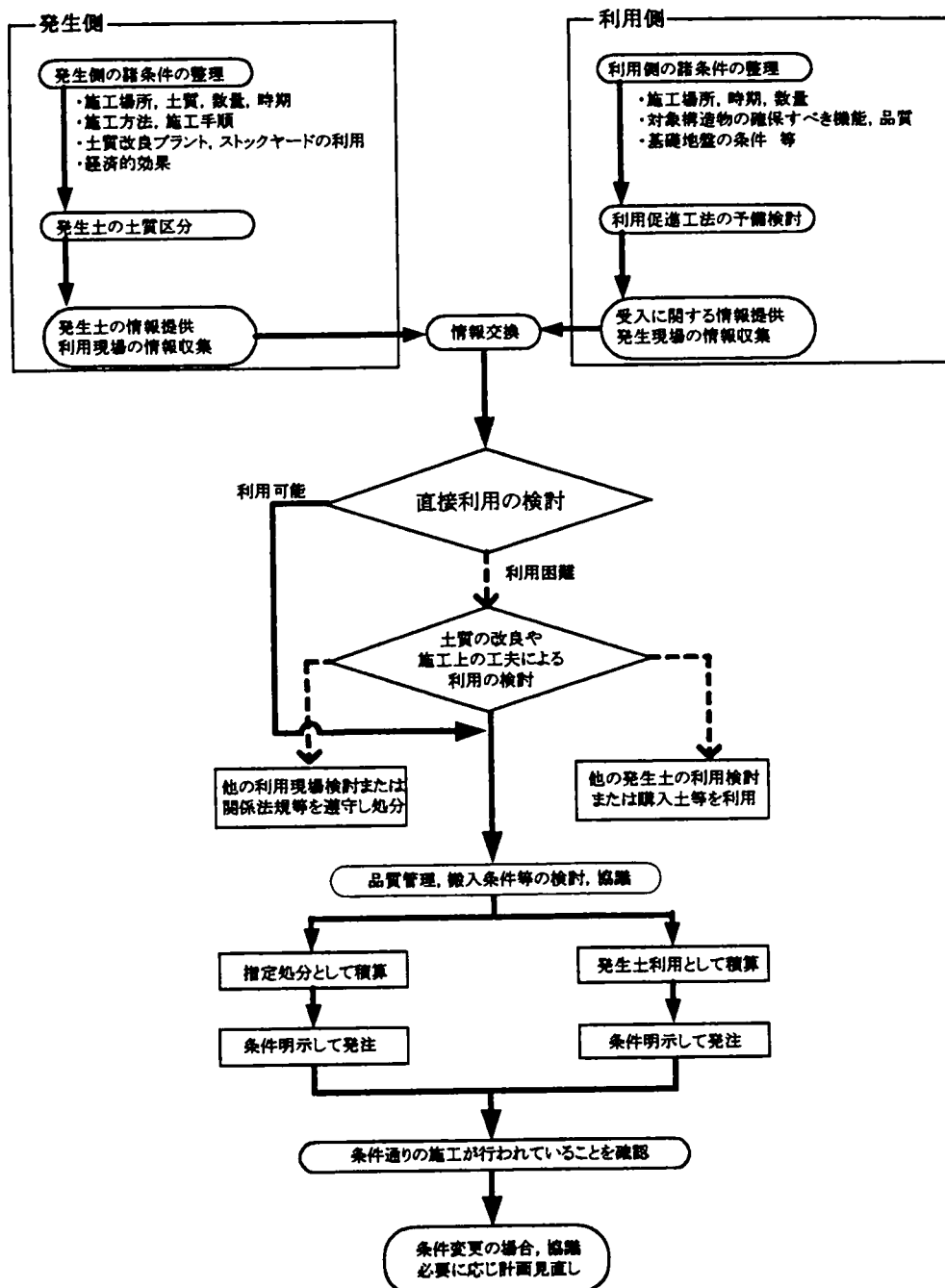


図 1 - 1 9 発生土利用の検討条件 ³⁾

(a) 発生側の考え方

発生側の行うべき事項には以下のようなものがある。

- ① 発生土の利用に関する情報の収集、または発生土に関する情報の提供。
- ② 利用時期の調整のため、必要に応じて発生土の保管場所(ストックヤード)の確保に努めること。
- ③ 発生土の性状は多種多様であり施工法などによっても大きく異なるので、必要に応じて土質改良や施工上の工夫を行い、利用されやすい性状として搬出するよう努めること。

(b) 利用側の考え方

利用側は、対象構造物の機能、品質の確保を大前提に、直接利用可能な発生土の利用に努めるとともに、土質改良や施工上の工夫により、「低品質な」建設発生土も利用するよう努めることが重要である。土質改良や施工上の工夫により発生土を利用する場合には、利用する発生土の土質性状と適用する工法の特徴、利点等を勘案し、適切な工法を選定しなければならない。

上にも述べたように、発生土の有効利用にとって需給バランスがきわめて重要な課題である。これに対し、昨今のIT技術による広域システムの形成は、モバイルシステムの高度化を含め、きわめて重要な役割を果たすことになると考えられる。

建設発生土についての広域有効利用システムは、現況では中間処理工場としてのセンター構想が主体で、首都圏や名古屋、大阪地区などでいくつか稼働していることが報告されているが⁷⁾、いずれも自治体等が自らの建設工事で発生する建設土砂を主体とした建設発生土についての域を出ていない。また、建設汚泥については、上記のセンターでも建設汚泥は不可となっており、民間の処理業者に委ねられている部分が多い。

一方、建設発生土の情報についてのデータベース化も政府系財団組織等により進められているが、先述のように需要・供給双方のミスマッチを機能的、システムの的に解決するに至っていない。このような状況の中での新しい試みの例について紹介しておきたい。

(3) 具体的な構想事例

(a) 発生土類の有効利用システムとセンター構想⁷⁾

建設発生土類の活用に関する具体的方策として、「情報」、「システム」、「全体組織(センター)」、「区分・基準」、「法規」の5つの要因について検討し、それらが上位計画段階(10年程度の事業計画段階)、中位計画段階(事業計画段階)および下位計画段階(計画・設計・施工段階)のそれぞれにどうセンターを機能させていくかを提案している。

その中で、とくにそれらが統合された重要な運用システム群について、

- ① 発生量予測システム
- ② 登録・検索システム
- ③ 最適配分システム

④ 運搬情報システム

⑤ 処理施設最適配置システム

の5つのシステムを分析し、ケーススタディとして中部圏における発生土類利用センター構想の中で、具体的評価が行われた。ただ、これらの事例研究はストックヤードと定置式改良プラントをベースにした、建設土砂を主体とした建設発生土に対するものであり、建設汚泥については言及していない。

(b) 建設汚泥リサイクル・パイロット事業²²⁾

建設副産物の中でも、とくに再利用率の低い建設汚泥と建設混合廃棄物の有効利用に焦点を当て、東京圏リサイクル・パイロットプラントの提案を行っている。

計画は、図1-20に示すように主として建築工事により廃出される建設混合廃棄物から可燃物を選別し、これを建設汚泥の焼成、固結、粒状化（礫・砂状）しようとするものである。

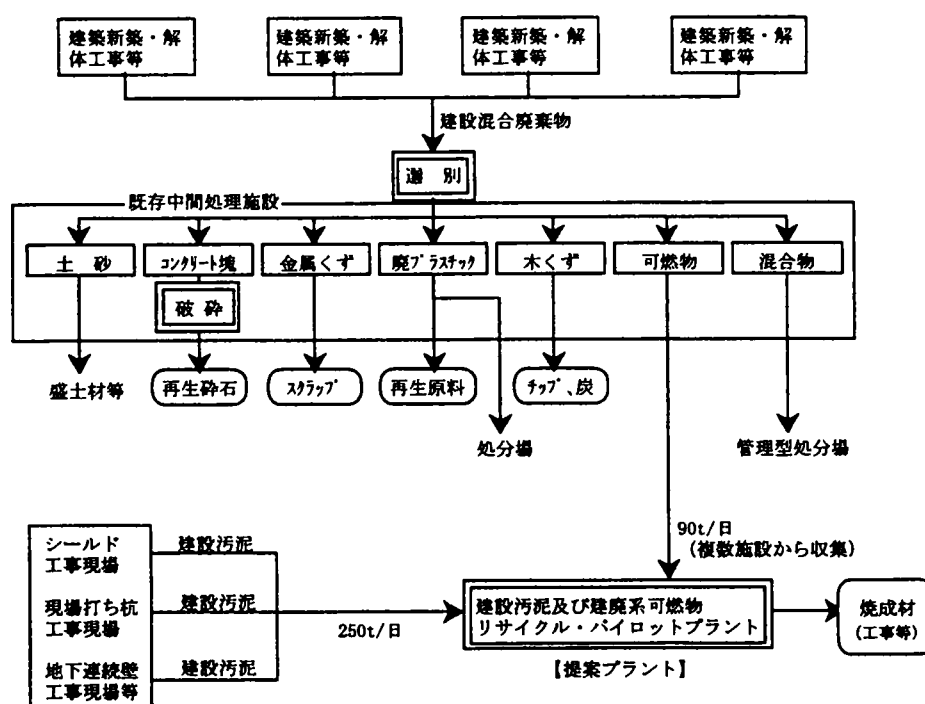


図1-20 対象建設廃棄物の受け入れまでのフロー²²⁾

1. 4 研究開発の視点と本論文の構成

1. 4. 1 研究開発の視点

これまでのべてきたように、近年に至って建設土砂のみならず建設汚泥の有効利用が注目されるようになり、新しい有効利用技術の提案や、従来の処理・処分とは異なった有効利用システムによる処理が行われはじめている。良質な砂質系の建設発生土は再生材料として利用できるが、粘性土や建設汚泥を利用する場合、法的には図1-21に示すように、いくつかの方法がある。

このうち本研究の対象は、①、③、④のような再資源化工場（中間処理施設等）を経由しないケースに関するものである。

本論文の中で、第3章の現場適用事例のうち、粘土注入や粘土モルタル遮水壁については③に、ReSMソイルモルタルについては①、③、④に、さらに第4章で述べる新しいマネジメントに対する考え方は④に、それぞれ対応することになる。

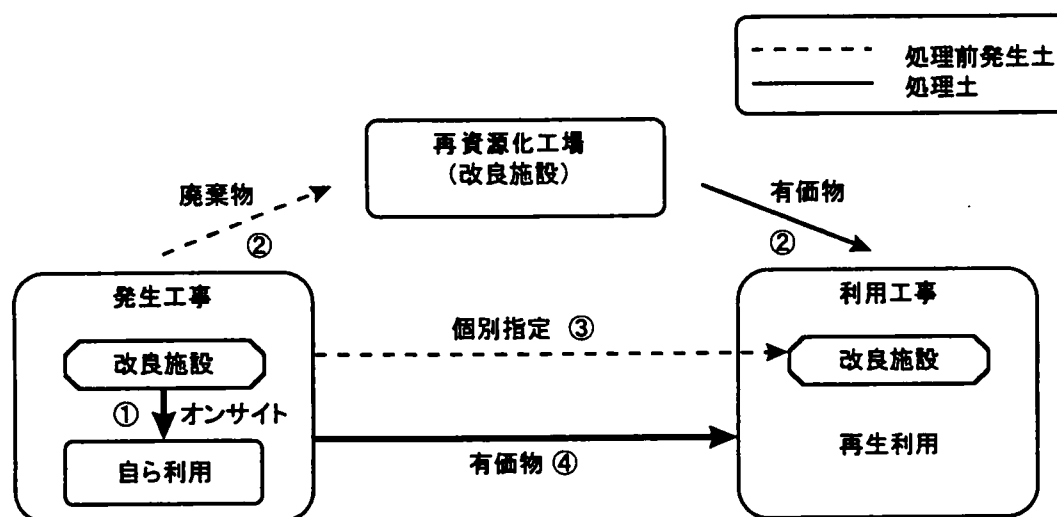


図1-21 建設汚泥のリサイクル手順

1. 4. 2 論文の構成

まえがきにおいて表-2のソイルモルタル研究開発経緯にも示したように、筆者の研究は、建設発生粘土の土留め・遮水壁材料としての有効利用に始まり、土圧シールド工法で発生する建設泥土系材料の埋め戻しへの大規模有効利用を経て、それらの概念さらに一般的にすべくいくつかの現場での実証的工事や、さらにはその時々における室内および現場実験を伴うものである。

本論文は、それらの一連の研究を総括して、

- (1) 研究の背景
- (2) 材料特性と適用分野
- (3) 現場での適用事例と課題

(4) 新しいマネジメントシステムへの展開

の流れで議論を展開するものであが、それらの流れが各章の構成にどのように反映されているかを整理したものが、図1-22である。

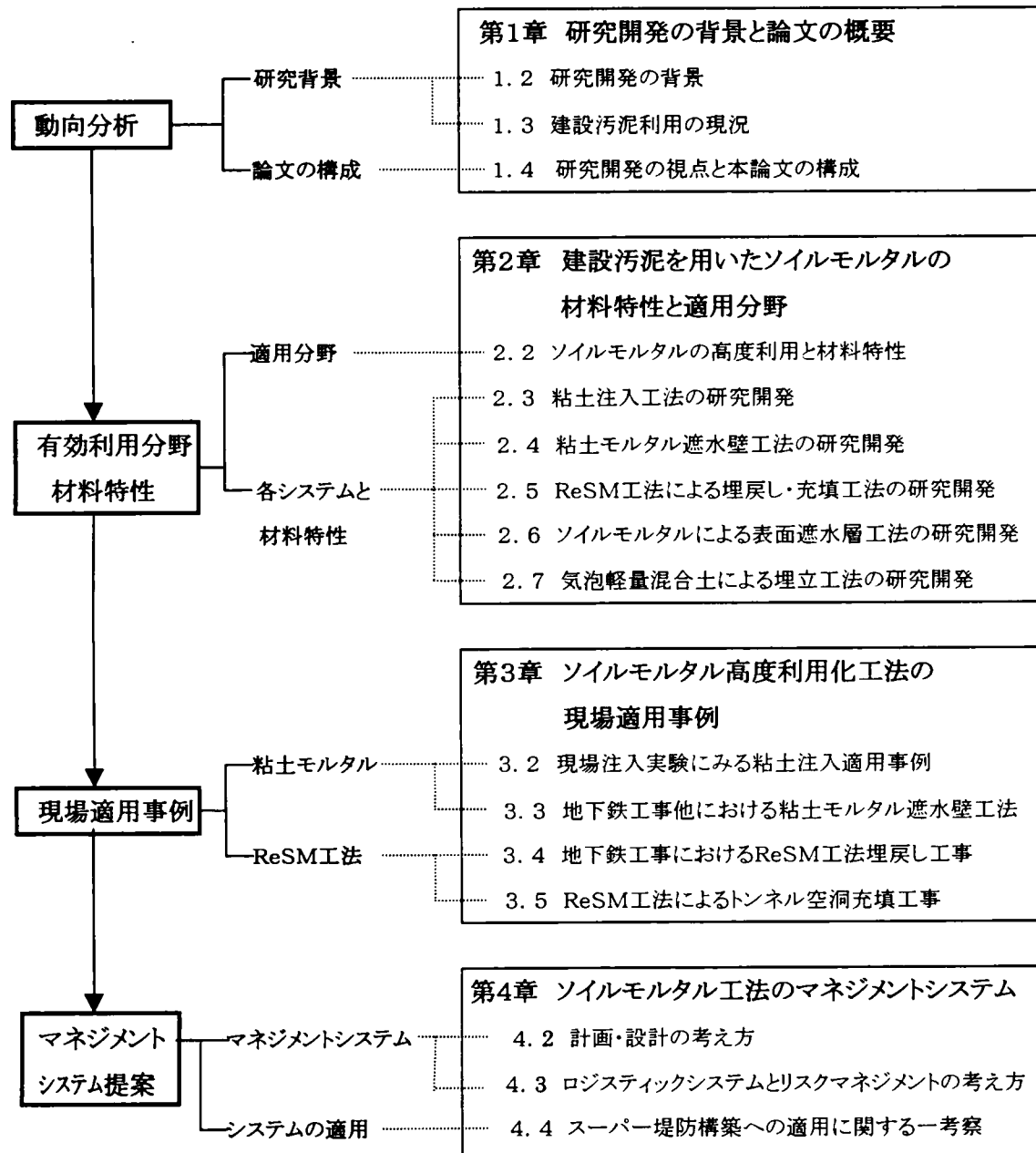


図1-22 議論の展開と本論文の構成

1.4.3 論文の要旨

(1) 第1章 研究開発の背景と論文の構成

本章では、建設汚泥や粘性土といった低品質な発生土を地盤材料に変換させるための、制度的、技術的側面についてその現状と課題を整理し、それらを背景としての本研究の構成と論文の要旨について記述するものである。

・1.1 はじめに

建設発生土は、未固結堆積物で、その生成過程から多種多様であり、同一現場内でも平面的、深さ的に変化するが、それらは、砂や礫など「高品質」な発生土と、シルトや粘土など建設汚泥を含む「低品質」な発生土とに分けられるとし、本論文での対象は主として後者である。

・1.2 研究開発の背景

建設発生土の取扱いについては、「適正な処分」という守りの部分と「再利用の促進」という攻めの部分とが拮抗して、必ずしも合理的な対応がとられてきたとは言えない側面があったが、1990年代の後半に入って「循環型社会の構築」を目指しての制度的検討や、現場を中心として研究開発への積極的な取り組みを経て、新しい段階に入ろうとしている。

本節では、「廃棄物処理法」、「リサイクル法」さらには「建設汚泥リサイクル指針」といった制度的経緯を概観し、それらを背景として筆者が取り組んできたソイルモルタルの位置づけについて述べている。

また、ソイルモルタルの特性としては、ソイルモルタルは「土」と「水」および「セメント」の混合物であるが、再利用しようとする建設発生土の主成分が粘性土で、粘土モルタルに代表されるように粘土鉱物が持つ界面化学特性を利用するものであり、いわゆる流動化処理土とは視点を異にしている。このため、粘性土をそのまま利用するのではなく、粉碎し汚泥化するものであることから、いわゆる建設汚泥の有効利用に直結していくことになる。

・1.3 建設汚泥利用の現況

建設発生土のうちとくに建設汚泥は、まえがきの表-1にも示したように平成7年度の再利用率が14%と、有効利用が難しく、大部分が産業廃棄物として管理型処分場において廃棄処分されてきたのが、これまでの状況であった。これに対し「リサイクルプラン21」では、平成12年度に60%にまで有効利用率を上げることを目標としたが、平成10年度の実績では土木・建築合わせて約37%と、必ずしも十分な成果をあげるに至っていない。

本節では、この建設汚泥について、基礎工や土留工、シールド工法といった建設汚泥を発生させる工法について現況を概観し、その発生の状況や改良技術の現況、さらには盛土、埋戻し・充填、掘削泥水・泥土といった有効利用の事例を紹介すると同時に、今後の課題等について整理している。

(2) 第2章 建設泥土を用いたソイルモルタルの材料特性と適用分野

本章では、ソイルモルタルの代表的な適用分野について、その概要とそれぞれの要求する

材料特性について述べることになるが、各節の要旨は以下の通りである。

・ 2.1 はじめに

本研究開発の視点は粘性土分を主体とする建設泥土を、中間処理プラントを経ないで現場間の直接需給をベースに、ソイルモルタルとして再利用することに関するもので、建設土砂としての粘土塊を粉砕し意識的に泥土化したものも建設泥土と称している。その技術の背景として重要な粘土鉱物のもつ界面化学的性質について概説している。

・ 2.2 ソイルモルタルの高度利用化と材料特性

本節では、種々高度利用が考えられるソイルモルタル工法の適用分野のうち、以下に示す代表的なものについて、その工法の考え方とその工法に必要なソイルモルタルの材料特性について概観し、次節以降のそれぞれの工法に対する研究の導入としている。

- ① 注入工法
- ② 遮水壁工法
- ③ 埋戻し・充填工法（ReSM工法）
- ④ 表層遮水層工法
- ⑤ 軽量土埋立て工法

・ 2.3 粘土注入工法の研究開発

注入材料としてローカルクレイを用いることが有用であるかどうかは、粘土中に含まれる粘土鉱物のサイズ、種類および含有量によって左右されることになり、土木技術者にとって関心のある注入の施工性、強度、止水性といった問題は、使用材料がローカルクレイである以上地域差が避けられない。大阪粘土が注入材として適性かどうか、かなり広範な室内実験を行って検証を行い、その可能性について研究成果を得た。

・ 2.4 粘土モルタル遮水壁工法の研究開発

粘土モルタル遮水壁工法には柱列杭工法と地中連続壁工法とが考えられるが、基礎的実験は後者の地中連続壁方式に主体を置いて行った。この地中連続壁方式は、さらに①置換方式、②泥水混合方式、および③泥水モルタル方式に分けられる。これらはいずれも粘土泥水や粘土モルタルを安定液として使用することになるので、安定液としての適用性と、最終的に出来上がった粘土モルタル壁の強度等諸特性とが問題となるため、それらに関連し種々の室内実験を行い、その適用性を確認した。

また、上記泥水混合方式を発展させて開発したケイソイル工法についても本節で紹介している。

・ 2.5 ReSM工法による埋戻し・充填工法の研究開発

建設汚泥以外の「低品質な発生土」で、これまでは産業廃棄物として扱われるケースもあった泥土や浚渫土も含めて、流動化処理土やソイルモルタルとして埋戻しや盛土、空洞充填などに積極的に有効利用することが具体化してきている。

ReSM（Re-produced Soil Material）工法などによるソイルモルタルは、流動性を高め

るために、他の処理工法に比べて土量比率が小さく、初期含水比(あるいは初期間隙比)が非常に大きい。このように間隙比ならびに含水比の大きい処理地盤では、強度だけでなく圧密特性も重要な問題となると考えられるが、これまで、ソイルモルタルの圧密特性に関する報告はあまり多くない。本節では、高含水比のソイルモルタルの圧密特性を調べるために、定ひずみ速度圧密試験を実施し、洪積粘土との比較や強度と変形特性の相対性等について検証を行った。

・2.6 ソイルモルタルによる表面遮水工法の研究開発

地盤空洞の埋戻し・充填に用いる場合には、ソイルモルタルは地盤内にあり含水比が地盤とほぼ同程度に保たれているため、乾燥に伴うひび割れに至ることはなく、設計上問題になることはない。一方例えば、ソイルモルタルを表層遮水層として使用する場合には、その影響を無視することはできないことになる。また施工面では、管理型の廃棄物最終処分場の遮水層に用いる場合には、ひび割れの問題だけではなく、斜面における均一な表層形成のための施工性も重要な要素となる。

本節では、これらの課題に着目して行った、ソイルモルタルのひび割れと斜面流下特性についての現場試験を含む各種実験に基づいた研究成果と今後の課題について述べている。

・2.7 気泡軽量混合土による埋戻し工法の研究開発

本論文の研究対象であるソイルモルタルは、地山の土や流動化処理土に比べ含水量が多く単位体積重量が小さいという特徴があるが、気泡を混入させることによりさらなる軽量化を図ろうということである。これまで、含水量が大きいことがソイルモルタルの物性にどのような影響を与えるか検討してきたが、その水の一部が気泡に置き換えられることによる影響について、強度・変形特性といった基本的な問題以外に、水中埋立てやそれに伴う消泡、減容といった点での実験的な研究結果と今後の課題について述べている。

(3) 第3章 ソイルモルタル高度利用化工法の開発と現場適用事例

第2章で述べた、様々な分野におけるソイルモルタルの高度利用に関する研究開発成果の現場適用事例として、現場での大規模な粘土注入実験、粘土モルタル遮水壁に関する現場実証実験および滞水砂礫層シールド遮水壁や開削工法での土留壁適用事例、さらにはReSM工法による地下鉄開削工事における広域的な埋戻し事例等について詳述するものである。

・3.1 現場実験にみる粘土注入適用事例

室内実験の結果大阪粘土は微粒分が多く界面化学的な特性も活発で、とくに止水を目的とした粘土注入の材料として適したものであるという結論を受けて、大阪市交通局地下鉄2号線(16工区)工事におけるシールドセグメント等材料投入用の堅坑部(内寸法19.100m×5.000m)を利用して実施した、2回の現場注入実験結果を中心に述べている。対象地盤は、中間にシルト層を挟んで上下に2層の滞水層を有しており、第1滞水層は細砂～中砂、第2滞水層は礫混じり粗砂で、いずれも 10^{-1} cm/secオーダーの透水係数を有する地下水の豊富な層である。

2 回の実験のうち、第 1 次現場実験の結果、粘土注入の効果について特に背面止水や透気試験、注水試験において他の市販の薬液と大きく劣ることはないものの、掘削に伴う目視確認では砂層内への顕著な浸透注入を確認することができなかったことを受けて、特に①粘土の種類と②ゲルタイムとについて室内実験等再検討を行い、第 2 次現場注入実験を実施した。その結果、注入状況の確認および透水試験結果も良好で、粘土注入は有効で安価な地盤改良工法として注目されるべき工法であるとの結論を得た。

・ 3. 2 地下鉄工事他における粘土モルタル遮水壁工法

種々の室内実験結果により、大阪粘土が遮水壁材料として十分使用できる見通しが得られたので、上述の注入実験に使用した豎坑掘削工事のための H-横矢板工法による土留遮水壁として実験用に採用した。実験の種類は、室内実験でその適用性を確認した、粘土モルタル PIP (Pile in Place) 工法および 3 種類の粘土モルタル連続壁工法 (置換方式、混合方式、泥水モルタル方式) で、いずれも良好な結果を得ている。

粘土注入および粘土モルタル遮水壁の研究開発は、地下鉄シールド工事の滞水砂礫層対策に関連して進められてきたが、対象となった大阪地下鉄 2 号線では総合的な判断の結果後者の粘土モルタル遮水壁をシールド補助工法として採用することになった。実績としては、粘土モルタル PIP 遮水壁を中心に作成した粘土モルタル約 6,600m³、粉碎した粘土は約 1,500t (粘土塊にして約 1,000m³) に及んでおり、遮水効果のほか圧気効果、地盤沈下に対する効果など大きな成果を得た。

本節においては、以上のような現場展開の詳細について詳述するとともに、その後本粘土モルタル工法を採用した 7 件の施工実績のうち、ポンプ室工事や地下鉄開削部工事での適用例についても紹介している。

・ 3. 3 地下鉄工事における ReSM 工法埋戻し工事

大阪地下鉄 7 号線大正延伸工区での土圧シールド掘削土は、メタンガス対策として発生土を坑内で大気に曝すことを避けるため塑性流動化状態で配管内をポンプ圧送して排出した。この含水比の高い発生土の有効利用の試みとして、地下鉄駅舎部開削工事での狭隘な閉所空間における山砂の埋戻し・振動締固めなどを不要とすることによる安全性の向上や、沈下量の少ない均質な人工地盤の効率的な構築を目的に、前章でのべた ReSM 工法により約 20,000m³ を超える埋戻しを行った。本工事への適用の特徴は、シールド土砂発生工区 4 工区、埋戻し適用工区 6 工区という、自ら利用を超えて広域的な再利用を行った点にある。

また技術的にも、加水量 (W) やセメント量 (C)、土量 (S) 等とソイルモルタルの物理、力学特性との相関を逐次管理し、累積値管理 ([打設量] の累積値と [打設量] × [一軸圧縮強さ]) という新しい管理方式に結びつけ成果を得ている。実際の施工面でも、狭隘な地下空間におけるすぐれた施工性や、側部埋戻しに伴う支保工撤去の際の土留壁変形の抑制等、大きな成果に結びつけることが出来た。

・ 3. 4 ReSM 工法によるトンネル空洞充填工事

本節では、大阪地下鉄工事での施工の成果が大規模に適用されたその後の事例として、

琵琶湖から京都市内へ導水する琵琶湖第二疏水トンネル（本坑延長 4,056m）の完成に伴い、その作業坑、水平坑および斜坑の埋戻し工法として採用された ReSM 工法の成果を紹介している。構造的に、斜坑は水平距離 500m で入口部と 100m の高低差をもつ約 12 度の勾配をもち、作業坑、水平坑へと繋がっているが、その距離と高低差を克服し、沈下による空隙や頂部までの完全充填が難しいことなどから、作業坑および水平坑頂部には気泡混合軽量 ReSM 工法を採用している。埋戻し総数量は約 15000m³に及んでいる。

（４）第４章 ソイルモルタルマネジメントシステム

本章では、これまでも述べてきたソイルモルタルによる泥土等建設発生土の有効利用システムのうち、ReSM 工法による埋戻し、空洞充填などの人工地盤築造を前提に、その計画・設計およびソイルモルタルの製造・運搬、品質管理を含む広義のロジスティックシステムの考え方について言及し、そのマネジメントシステムの適用分野の例として、オール廃棄物再生利用によるスーパー堤防築造の考え方について提案してみたい。

・4.1 計画・設計の考え方

本論文で筆者らが提案している ReSM 工法は、地盤材料のバラツキに応じて逐次配合を変えることにより不確実性を極力廃した工法であり、それをベースに設計的にも全体をマスとして捉えようとするもので、これまで地盤改良に適用されてきた限界設計法に基づく、過大な安全率を見込んだ信頼性設計を再検討しようとするものである。これを精密地盤改良（Precision Soil Stabilization）と称しているが、筆者らが新しく提案しているマネジメントの概念であり、10年ほど前に米国で提案され、欧米で発展・普及した精密農法（Precision Farming）を発想の原点としている。

・4.2 ロジスティックシステムとリスクマネジメントの考え方

ReSM 工法による精密地盤改良システムを具体化するためには、それを構成する次の 4 つのサブシステムを完結させる必要がある。

- ① 発生工区マップ管理システム
- ② 改良工区マップ管理システム
- ③ 意思決定システム
- ④ 可変作業管理システム

このうちもっとも重要で基本的なものが③意思決定システムで、この方法は、施工実績が蓄積されるに従って強度のバラツキが小さくなるという特徴を持っている。具体的には、第 4 章でも触れる累積管理の考え方であり、累計確率管理手法をベースにしている。

一方、精密地盤改良システムの 4 つのサブシステムのうち、前述の③意思決定システムを除く 3 つのシステムは、いずれも物流管理に関するシステムとなるが、そのシステムの管理帳票事例を上げてそのあり方を概観している。

さらに、建設発生土再生利用の終局の方策は、広域化、IT 化であり、流通でいうジャストインタイム方式としてのサプライチェーンマネジメント（SCM）システムについて考

察している。

また、以上のようなロジスティックシステムを精密地盤改良システムに反映させるためには、いまひとつリスクマネジメントの考え方をコンバインさせることが重要となる。

本節の後半では、広く建設事業分野との関係でリスクマネジメントの概念を整理し、それらがソイルモルタルによる人工地盤構築の各段階でどのように反映され、また、とくに精密地盤改良システムとの関連でどう展開されるかを考察している。

・ 4.3 スーパー堤防構築への適用に関する一考察

汚泥と同じく建設系産業廃棄物であるコンクリートやアスファルトガラ、木片、陶器・ガラス片などをソイルモルタルとコンバインして有効利用を図り、オール廃棄物再生利用堤防を構築することを提案しようとするものである。

例えば、首都圏における産業廃棄物の処理状況は、各廃棄物とも再生利用の他、とくに減量化に対する貢献比率が大きいですが、それでもなお最終処分量は年間750万トンにも上っており、汚泥やがれき類等上記の埋立て材料がその大部分を占めることを例に上げ、その妥当性を示すとともに、それを実現するためには引き続き制度的、商習慣的課題を克服していく必要性を強調している。

【 第1章 参考文献 】

- 1) 建設省大臣官房技術調査室監修：建設発生土利用技術マニュアル，財団法人土木研究センター，1994年7月
- 2) (財) 土木研究センター：発生土利用促進のための改良工法マニュアル，1997年12月
- 3) 建設省建設経済局建設業課監修：建設リサイクル法の解説，大成出版会，2000年9月
- 4) 厚生省水道環境部産業廃棄物問題研究会監修；最新建設廃棄物処理指針「建設廃棄物処理ガイドライン」，株式会社ぎょうせい，1990年
- 5) 嘉門雅史：建設における発生土の種類と処理・利用の問題点，基礎工，pp2～6，1998年11月
- 6) (財) 先端建設技術センタ監修：建設汚泥リサイクル指針，大成出版会，1999年11月
- 7) 松尾稔・本城勇介編著：地盤環境工学の新しい視点－建設発生土類の有効活用，技報堂出版，pp.167～，1999年4月
- 8) 久野悟郎編著：土の流動化処理工法，技法堂出版，1997年5月
- 9) 建設副産物リサイクル広報推進協議会：総合的建設副産物対策－13年度版，2001年5月
- 10) 有岡正樹：日本のシールド技術（機械設備と施工），(社)大韓土木学会釜山・廣南支部特別招請講演会テキスト，1997年2月
- 11) (社)日本トンネル技術協会：トンネル技術ステップアップ研修会－シールドトンネル－，pp217，2000年2月
- 12) 森邦夫，徳永雅英，トシ デュタ フィ オフ，佐々木宏二：発生土および廃棄物の地盤工学的処理と有効利用 4.発生土の地盤工学的有効利用（その2），土と基礎，Vol. 45，NO.2，pp55～60，1997年2月
- 13) 三木博史：発生土の再生利用事例，第47回建設省技術研究会共通部門指定課題論文集，1993年
- 14) 猪瀬一敬・伊東・柴田：泥土改質・エンデシシステム（プラント固化）の紹介，ヘドロ，No.48，pp63～66，1990年
- 15) 助川 禎：地下鉄シールド工法における環境保全・省資源技術の研究開発と適用，中央大学博士論文，1995年
- 16) 助川 禎：泥水シールド余剰泥水利用の埋戻し工法の開発，土木学会論文集，No. 492，1994年
- 17) 助川 禎・中島 信・小野重剛・上釜建一・久野倍郎：泥水式シールド発生土の再利用 その2－シールドインバート部利用，土木学会第48回年次学術講演会，1993年
- 18) 好井宏太郎・助川 禎・藤木育雄・河野隆明・佐藤潔：泥水式シールド発生土の再利用 その1－泥水処理土，土木学会第48回年次学術講演会，1993年

- 19) 地中連続壁施工協会：掘削残土・汚泥の処理－連壁工事における処理例，基礎工，
Vol. 19, No.4, 1991年
- 20) 山村 健：連壁工事における掘削残土処理の問題点，基礎工，Vol.19, No.4, 1991年
- 21) 板場武彦・渡辺 勲・榎木利弘：白鳥主塔基礎について－地中連続壁発生材の有効利
用について，北海道開発局技術研究発表会講演機要集，Vol.33, No.1, 1990
- 22) 建設団体副産物対策協議会：建設汚泥および廃棄可燃物のリサイクル・パイロット事
業構想提案書，2000年4月

第2章 建設泥土を用いたソイルモルタルの 材料特性と適用分野

2.1 はじめに

第1章1.4.1でも述べたように、本研究開発の視点は粘性土分を主体とする建設泥土を、中間処理プラントを経ないで現場間の直接需給をベースにソイルモルタルとして再利用することに関するもので、建設発生土としての粘土塊を粉砕し意識的に泥土化したものも建設泥土と称している。その背景としては、粘土鉱物のもつ界面化学的性質をあげることが出来るが、その利用の仕方は適用分野により異なり、材料としての特性も変わってくる。

本章では、ソイルモルタルの代表的な適用分野について、その概要とそれぞれの要求する材料特性について述べることになるが、その前提としての粘土の界面化学的特性および適用分野と材料特性の関係について触れておきたい。

(1) 粘土～セメント系における界面化学的特性

粘土を、イオンを含む水溶液に触れさせておくと、粘土粒子の表面にイオンの集積が起こり、これをイオン吸着反応と呼んでいる^{1), 2)}。この現象は関与するイオンの帯電、反応特性により異なるが、最も普遍的な反応は陽イオン交換である。図2-1(1)に示すように水中で負に帯電した粘土粒子の回りに交換性陽イオンが集積し二重構造（ミセル）が形成され、電気化学的な粒子間の反発力により安定した懸濁状態を示す。この電気二重層の外殻である交換性陽イオンは、その名の通り比較的容易に他の陽イオンと交換されることになるが、粘土懸濁液にセメントを混合した場合、セメントの Ca^{++} 、 Na^{+} 、 K^{+} などの陽イオンがその粘土コロイド表面の交換性陽イオンと水のイオンを介在して交換、並び替えられ、図2-1(2)に示すようなサスペンションを形成しゾルよりゲルに移行する。なお、このサスペンションは電気化学的なイオン結合であるため攪拌等により容易に崩壊しゾル状態に戻る。この現象（チキソトロピー現象）が、攪拌状態におかれた粘土～セメント混合物が時間を経ても流動性を失わないという点で、後述の粘土モルタル遮水壁やReSM工法の利点となっていることを強調しておきたい。

いずれにしても、このようなサスペンションが有効に形成されるためには、粘土粒子が負に帯電し陽イオンを解離する必要があるが、その程度は粘土鉱物の種類によって異なり、定量的には陽イオン交換容量（CEC）なる量で示される。表2-1は代表的な粘土鉱物について、粘土鉱物の大きさと陽イオン交換容量を示しているが、これによるとモンモリロナイトは他の粘土鉱物に比べ数倍から10数倍の電氣的活性を有することが知られる。また、粒子の大きさととの関係では、その大きさが小さいほどCECが大きくなっており、後述のように粘土～セメント系材料の良否が使用する粘土の2ミクロン以下の量により評価される理由がここにある。

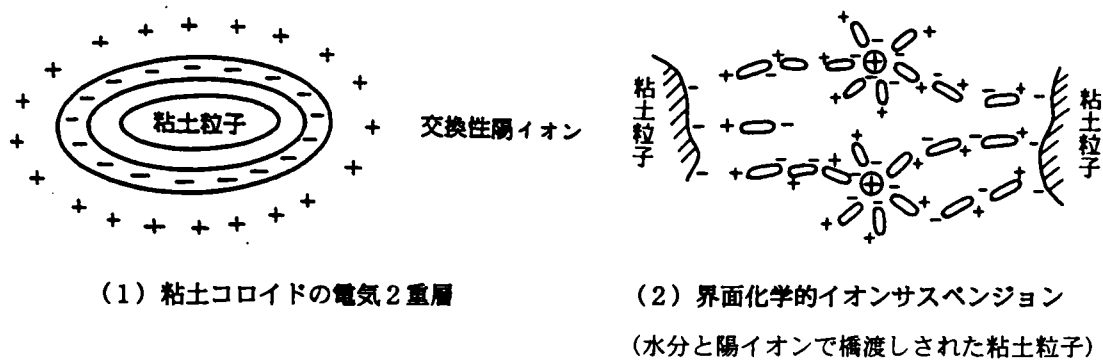


図2-1 粘土鉱物のもつ界面化学特性¹⁾

表2-1 粘土粒子の大きさ、陽イオン交換容量²⁾

粘土鉱物	結晶幅 (μ)	層数	厚さ (μ)	比表面積 (m^2/gr)	陽イオン交換容量 ($\text{meg}/100\text{gr}$)
カオリサイト	0.3 ~ 4	50 ~ 200	0.05 ~ 2	10	5 ~ 15
ハロイサイト	0.05 ~ 1	—	数 μ		10 ~ 40
モンモリロナイト	0.1 ~ 0.5	1 ~ 5	0.001 ~ 0.005	800	80 ~ 150
イライト	0.1 ~ 0.5	10 ~ 50	0.005 ~ 0.05	80	10 ~ 40

(2) 材料の性状・特性と適用分野

ソイルモルタルには目的毎にいくつかの材料特性的共通点があるが、適用分野と材料の性状や材料特性としての密度、流動性、界面化学特性等の違いによって、適用分野との関係を図2-2のように概念的に整理することができよう。

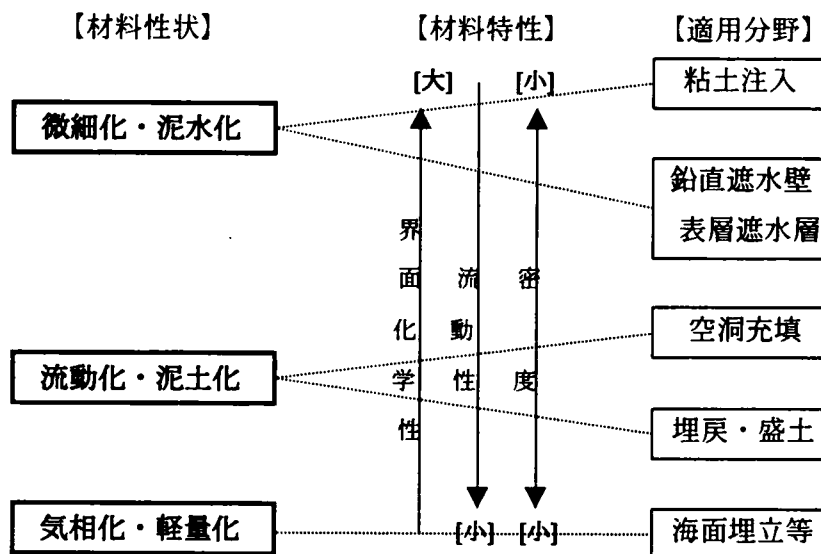


図2-2 ソイルモルタルの適用分野と材料特性との相関

2.2 ソイルモルタルの高度利用化と材料特性

本節では、種々高度利用が考えられるソイルモルタル工法の適用分野のうち、代表的なものについて、その工法の考え方とその工法に必要なソイルモルタルの材料特性について概観し、次項以降のそれぞれの工法に対する研究の導入としたい。

2.2.1 注入工法

現場付近で採取される粘土を利用して地盤改良注入を行う試みは諸外国では多く見られ、有名なものとしてはナイル川アスワンハイダムの大規模な止水グラウトが有名である。これに対して我が国では、当時でもセメントベントナイト（CB）など製品化された材料を使っ

ての注入実績は多く見られたが、ローカルクレーを使用する注入材の系統的な研究開発は遅れており、わずかに東京電力の岩田ら^{3), 4), 5), 6)}による関東ロームに対する研究が行われていた程度であった。

いずれにしてもこれらの粘土注入は、上述のCB注入と本質的には同じであるが、ただ製品としての高価なベントナイトを用いる代わりに現地発生土としてのローカルクレーを用いて大量に行おうとするところに大きな特色がある。

ここではその注入材としての配合原理といくつかの例を簡単に紹介しておくことにする。

（1）岩田らの研究^{3), 4), 5), 6)}

岩田らは深層砂礫層の止水に関し、注入材としてローカル粘土を採用するためにいくつかの基礎的研究を行ったが、その条件として次の3点を挙げている。

- ① 均質な注入が行われるためにブリージングを生じないこと
- ② 注入がある範囲で止めるために適当な時間でゲル化すること
- ③ 注入された材料が地下水流等で流出しないようある程度のせん断抵抗を有すること

これらの条件が満足されるためには、①、②に対して、注入材はゾル状態における水量を保持したまま適当な時間でゲル化する必要がある、③に対しては、当初よりある外力以下では流動しないようなある程度の強度が必要となる。このような性格を有するものをチキソトロピー性塑性流体挙動と呼んでいるが、これは前節で述べた粘土～セメント系の界面化学的特性によるものである。

岩田らが研究に使用したローカルクレーは関東ロームで、その代表的な粒土分布を後述の図2-9に大阪粘土との比較で示しているが、細粒分が少なく、また主要粘土鉱物がアロフェンとハロイサイトであるため活性が鈍くそのままでは注入材として十分とはいえないので、モンモリロナイト系のベントナイトを添加している。

以上に基づく岩田らの一連の研究結果を要約すると以下の通りである。

- ① 注入材としての各種条件を考慮した適性配合

$$\frac{W}{C+B+L} = 2.5 \quad \frac{B}{L+B} = 0.3 \quad \frac{C}{C+B+L} = 0.3$$

ここに、C：セメント重量、W：水量、B：ベントナイト重量、L：ローム重量

② 関東ロームに対する上記配合の力学特性は表2-2に示す通りである。

表2-2 関東ロームに対する注入材（ホモゲル）の力学特性⁴⁾

項 目	7 日	2 8 日
一軸圧縮強さ (kN/m ²)	90 ~170	150 ~320
透水係数 (×10 ⁻⁶ cm/sec)	13.9 ~35.4	3.1 ~7.9
弾性波速度 (km/sec)	1.92	1.98

③ 室内注入実験によれば、砂礫を使った模型地盤について注入前 10⁻¹ cm/sec オーダーの透水係数が注入1週間後には 10⁻⁴ cm/sec にまで改良され、また、注入時に人工的に与えた水流 90cm/hr に対しその影響は無視できるとしている。

④ みかけの粘度とせん断速度の関係から、材料の混合については混合ミキサーが高速のものほど粘性が低下し、注入が容易となる。また、混合に当たっては粘土の界面化学的な性質からみて、水とベントナイトを含む粘土材料との混合を十分に行った後セメントを加えることが重要である。

岩田らは、これらの研究成果をもとにトンネル裏込注入および廃坑処理工事に適用し成果を上げているが、実際の地盤注入への適用までには至っていない。

(2) 諸外国の例

注入にローカル粘土を用いた例は、Mangra (パキスタン)、Serre Poncon (フランス)、Shek Pick (ホンコン)、Aswan High (エジプト) 等の大ダムのカートングラウトや Blackwall (英国) のトンネル工事の止水グラウトとして報告されている。これらのグラウト施工法の共通した特徴の一つとして、いずれもマンシエットチューブという2重管注入方式を採用していることであるが、今日の日本でもこうした多重管注入方式が一般的となってきた。

ここでは、上記の例のうち Blackwall トンネルと Aswan High ダムについて実際の地盤における注入例として紹介しておきたい。

(a) Blackwall トンネルの例⁷⁾

図2-3に見るように河床下 4.5m の土被りで外径約 9.3m の道路トンネルを建設しようとするもので、2本のパイロットトンネル (外径 2.1m) から本トンネル全周にわたって大規模な粘土注入を行っている。そしてアーチ部のとくに入念な改良を必要とする部分については、粘性の低いリグニンスルホン酸系の化学的薬液で注入補強している。

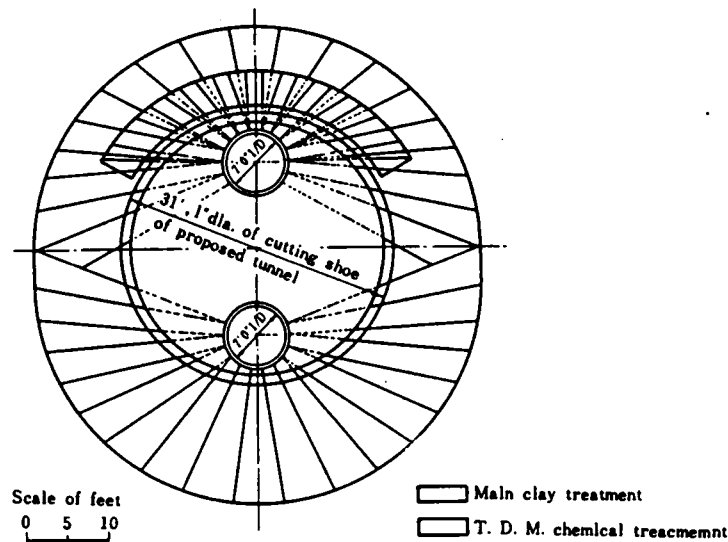


図 2 - 3 Blackwall Tunnel における粘土注入 ⁷⁾

また、注入に当たっては、制御室を設置し坑内から刻々と送られてくる注入圧、注入率や注入量などのデータを反映させながら大規模な管理を行った。

(b) Aswan High ダムの例 ^{8), 9)}

Aswan High ダムは周知の通りエジプトナイル川に築造された世界でも最大級のロックフィルダムの一つで、貯水量 1,640 億 m^3 、電力 210 万 KW の規模を誇っており、1970 年に完成したものである。ダムの断面と河床部の地層構成は図 2 - 4 に示すとおりであるが、河床部のカーテングラウトの設計に対して、電気アナログ法による模型実験、注入材の配合試験を始め現場での大規模な実験が実施された。試験注入のレイアウトは省略するが、粗砂層に対しては Aswan local clay が用いられ、注入前後における透水係数の変化は注入前の $2.5 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ が、 $2.3 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ に減少している。

本工事における注入対象土量は 180 万 m^3 という莫大なもので、ダムのカーテングラウトとしては世界最大であろうといわれている。またこれに使用したローカルクレイは 1μ 以下 23%、 5μ 以下 57%、自然含水比 3% 以下となっている。注入方式はすべてマンシェット注入方式になっており、平均注入圧は 30 kg/cm^2 と大きいものであるが、もちろん注入の制御は自動的に行われた。

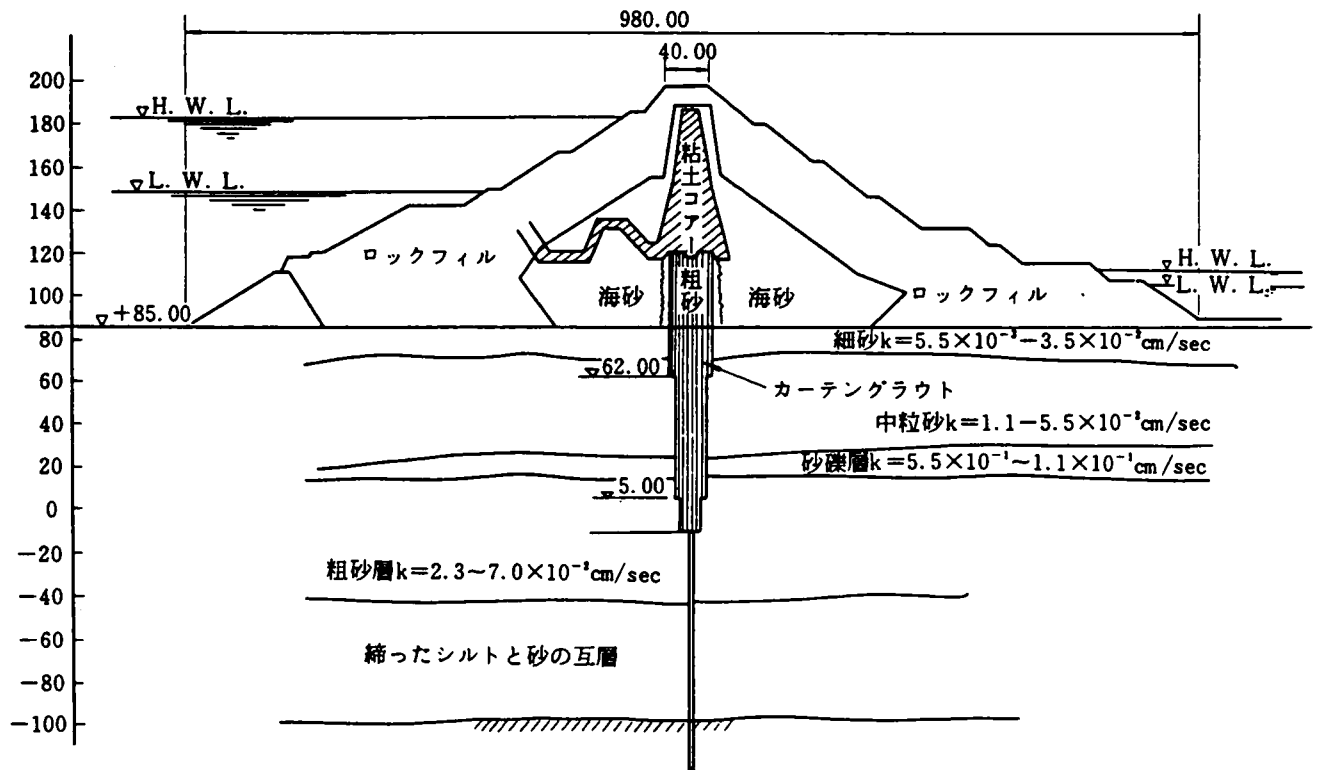


図 2-4 アスワンハイダムの代表的な断面 ⁸⁾

2. 2. 2 遮水壁工法

前記の粘土注入研究開発の動機付けとなった大阪市交通局地下鉄 2 号線 (16 工区) におけるシールド工事は、次章 3. 2 で述べるように地下水の豊富な滞水砂礫層でその地下水処理が大きな問題となったが、補助工法として両側に遮水壁を施工し地下水位低下工法と圧気工法とを併用することになった。この遮水壁は種々の理由から弱強度材料が好ましいということになり、粘土・セメントモルタル (粘土モルタル) を使用することが検討された。

(1) 粘土モルタル遮水壁工法の概要

粘土モルタル遮水壁工法とは、

- ① 湿式粉碎したローカル粘土 (付近で発生する粘土) を用いて
 - ② 地盤中にその地盤と同等強度の
 - ③ 鉛直不透水層を人工的に
- 作り出すものである。

従来より開削工法において土留壁として用いられる柱列杭工法や地中連続壁工法では、とくに地下水位の高い砂地盤の場合、ジョイント部の止水が一つの大きな問題となってくる。今日でこそ技術開発が進み、施工上の問題点は解決されてきているが、当時は例えば連続壁工法ではジョイント部にインターロッキングパイプを用いるなど種々の工夫がなされるものの、完全なものとは言えず、また柱列杭工法の場合はラップ施工の時期が問題となり、そ

の時期がずれると不完全なラップのため激しい漏水に会うことも稀ではないという状況であった。これらの原因の一つとして材料が高強度であることがあげられるが、これに対し粘土モルタルのような弱強度材料では、ラップ施工の時期に関係なく既設のエレメントや杭を削り取ることができるため、大きな止水効果が期待できることになる。

そのほか粘土モルタルを遮水壁材として使用することのメリットとして、次のような諸点をあげることができる。

- ① 粘土モルタル中の粘土微粒子が止水、漏気防止に効果的である。
- ② 粘土のもつ界面化学的な特性により、砂、セメント、水等の分離が少なく、長距離のポンプ圧送が可能である。
- ③ 弱強度であるので地中に残置しても他日の障害とならず、また残余モルタルの処理も簡単である。
- ④ 連続壁工法など安定液を必要とする工法では、その処理をほとんど必要としない。
- ⑤ 主材料としてローカル粘土を粉砕して用いるため、他の材料に比べて経済的である。

また、粘土モルタルは後述のように通常の土留杭の建て込み施工に用いることもでき、この場合土留横矢板の挿入において杭周りのモルタル除去が簡単となり、施工性がきわめて良いという利点も有している。

(2) 遮水壁構築工法

工法的には、表2-3に示すように柱列杭工法および地中連続壁工法の2通りが考えられるが、とくに連続壁工法の場合にはについて、粘土泥水や泥水モルタルを安定液として用いる種類の新しい工法を研究開発している。

表 2 - 3 粘土モルタル遮水壁工法

工 法		概 要
柱列杭工法	PIP 工法*	粘性が小さいので基地からオーガーへの直接圧送が可能である。ラップが容易であるので十分な止水効果が期待できる。
	BH 工法**	ベントナイト泥水で掘削し粘土モルタルで置換する。劣化泥水を粘土モルタルのベースとする。原則的に連側壁の下記3工法が適用できる。
連続地中壁工法	置換方式	粘土泥水を安定液として掘削し粘土モルタルと置換する。一度使用した粘土泥水は粘土モルタルのベースとする。
	泥水混合方式	掘削には比重の大きい粘土泥水を使用し、掘削を終了後モルタルを圧送、地中で泥水と混合して粘土モルタルを造成する。泥水処理が少ない。
	泥水モルタル方式	自硬性の泥水モルタルを安定液として掘削し、掘削終了後掘削機械を除けば泥水モルタルが固化し、止水壁が完成する。分散材を使用すれば10時間程度の掘削が可能となる。

* PIP (Pile in Place) , ** BH (Bore Hole または Boring Hole)

2. 2. 3 埋戻し・充填工法（ReSM工法）

ソイルモルタルのみならず流動化処理工法の適用分野としても、もっとも可能性が大きいのは、盛土を含む埋戻し、空洞充填等マスとしての人工地盤構築ということになろう。本研究のいまひとつの背景として焦点を当てている、建設発生土供給現場と埋戻し等ソイルモルタル需要現場間での需給対応に対する手法として開発されたのがReSM工法である。

（1）ReSM工法とは^{10) ,11)}

（a）工法の概要

ソイルモルタルや流動化処理土を、埋戻しや空洞充填などに用いることの利点として、

- ① 粘性土を中心にあらゆる土質の発生土の有効利用が可能である
- ② 流動性をもち締め固めが不要である
- ③ 流動性・強度を任意に設定できる
- ④ 透水性が低く粘着力が高いことから地下水の浸食を受けない
- ⑤ 粘着力が高いため地震時に液状化しない
- ⑥ 打設後の体積収縮や圧縮が小さい

などの特徴をもつことが共通点として知られている。

しかし、流動化処理土およびソイルモルタルのいずれにしても、発生土の利用率が大きいと材料特性（砂分の多少）の違いにより処理土の強度のバラツキが大きくなるという問題がある。このため、発生場所が異なり、性状の異なる発生土をストックヤードに持ち込み、大型プラントで連続処理する定置型処理プラント方式で調泥等により配合を設定する場合、それらの条件に対し最小公倍数的に目標強度を確保しようとするため、全体として大きめの強度になる傾向がある。また、打設工区が定置型プラントから離れており、運搬・打設待ちが数時間におよぶ場合には、品質劣化が懸念されるケースも多い。このように建設発生土としての材料の多様さ、施工状況などにより、均質な流動化処理土やソイルモルタルを製造して人工地盤を構築することは、想像以上に難しい技術であると言える。

そこで著者は、独自の施工品質管理システムに基づいて、硬い粘土塊でも微細粒子に粉碎するようドラム内部を改造したミキサー車に、水、固化材（セメント）および建設発生土を直接積み込み、攪拌して得られたソイルモルタル材料をそのままミキサー車で運搬し、高流動状態で埋戻し・充填箇所などに打設することで、掘削土を任意の強度の均質人工地盤として再構築することのできる、ReSM（Re-produced Soil Material）工法を開発した。

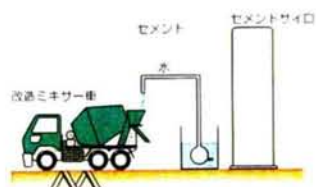
このReSM工法は、原理的には以前から行われてきたソイルモルタル工法の一つであるが、従来工法では均質な強度を得ることが困難であったことや、大型プラントで粒度調整しなければ要求品質（強度）管理が困難であったことなどの問題があった。これに対しReSM工法では、移動可能な改造ミキサー車により、いかなる場所（例えば都市土木のような作業スペースが確保できない現場など）でも、処分の対象となる発生土をその場でソイルモ

ルタル製品化し、そのまま需要現場まで運搬して、埋め戻し、充填、補強などの目的に応じた要求品質（強度や透水性等）の土質材料として有効利用することができる。

ReSM工法の概念およびその工法に用いる改造ミキサー車について、図2-5に示す。

●準備・配合決定、セメント・水投入

- 建設発生土単位体積重量測定
- 配合調整 → セメント・水を計量投入



●建設発生土投入

- 改造ミキサー車に建設発生土を投入
- 建設発生土投入中も低速混練



低速混練

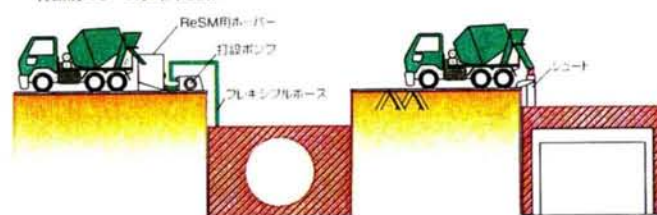
ReSMの標準配合の例

(処理土1m当たりの標準配合の例)

	セメント (kg)	水 (ℓ)	土砂 (m ³)	目標強度
A	100	468	0.50	人力で再密着できる強度 0.2MPa<qu<0.5MPa
B	200	437	0.50	(発生土の土質により) 0.6MPa<qu<3.0MPa
C	300	437	0.47	

●打設工

- 打設前に3～5分間高速混練



改造ミキサー車のトラム内部改造図

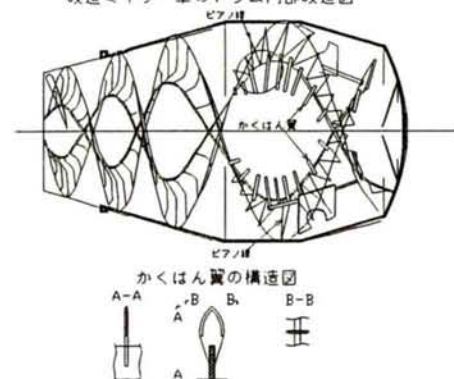


図2-5 ReSM工法施工概要¹⁰⁾

(b) 工法の特徴

ReSM工法の特徴は、これまでの流動化処理土と比べて、計量の簡略化、砂礫などの混入土も混合できる柔軟さ、施工の容易さなども特徴の一つである。以下にそれらの特徴を、システム面および品質管理面に分けて箇条書き的に整理してみた。

i) システム面

① プラントが不要で都市土木に適したシステム

建設発生土と水、固化材の混合・搬送を特殊な攪拌装置をもつ1台の改造ミキサー車で行う移動型の小規模処理システムであり、特殊なプラントやストックヤードが不要のため、建設規模の大小や地域に関わらず建設発生土の再利用率を高めることが可能となる。処理量や連続しての処理期間がまとまっている場合は、現場にセメントサイロを設けることが有利となるが、量が少なく不定期または短期間の場合は、近辺の生コン会社で投入することを前提に現場またはストックヤードで必要な設備を土砂投入装置のみとすることもできる。このように都市土木のような狭いスペースの建設工事でも、建設発生土の再利用率を高めることができる。また複数現場間で、必要な時に必要な台数のミキサー車を配車調整することが可能である。

② 処理量の増減に簡単に対応できる

埋め戻しの増減は、上述のように改造ミキサー車の増減で対応できる。この場合余った改造ミキサー車は通常の生コン車として利用できるため設備費を大幅に低減できる。

③ 全体システムとしての安定性

故障による作業中断の懸念がほとんどなく、例え故障・破損したとしても修理が簡単・容易である。また、通常は数台のミキサー車を使用するので、1台が故障することによる処理システム全体に与える影響は小さく、系全体として安定したシステムといえることができる。

④ 情報ロジスティックス化の可能性

IT技術の展開により、土砂の発生現場と埋め戻し材料需要現場との情報化が進展することにより、より効率的、効果的な資源配分が可能となる。

ii) 品質管理面

① 品質管理が容易

目標とする物理・力学特性を満足するよう配合設計は、現場採取試料の試験結果を十分にフィードバックできる柔軟な施工システムであることが発生土利用の前提であるが、ReSM工法は施工品質を保証するため、室内試験や現場試験によるフィードバック型の発生土現場側の施工品質管理システムに基づいて固化材、水、発生土の配合比率を調整することが可能となる。

② 土砂の計量装置が不要

配合設計は、水・セメント量を混合したものに発生土を加えたソイルモルタルの出来

上がり量で管理するため、低速混合しながらドラム内で定量（ $5.0\sim 5.5\text{m}^3$ ）になるまで土砂投入すればよく、土砂重量の計量が不要である。このため土砂投入設備、サイクルを簡略化、短縮化できる。

③ 砂礫・異物が混入していてもミキサー混合可能

改造ミキサーの構造上、吐出口からの排出が可能な範囲で玉石やコンクリート片などが混入していても、混合が可能となる。

④ 長時間の品質安定性

粘性土分を多用する工法であることから、本章2.1にも述べた粘土～セメント系の電気化学的な特性により常に攪拌された状態では、かなりの時間配合時品質を維持できるという特性がある。図2-6に現場で行ったミキサー車によるソイルモルタル混練時間と強度との関係を示す。

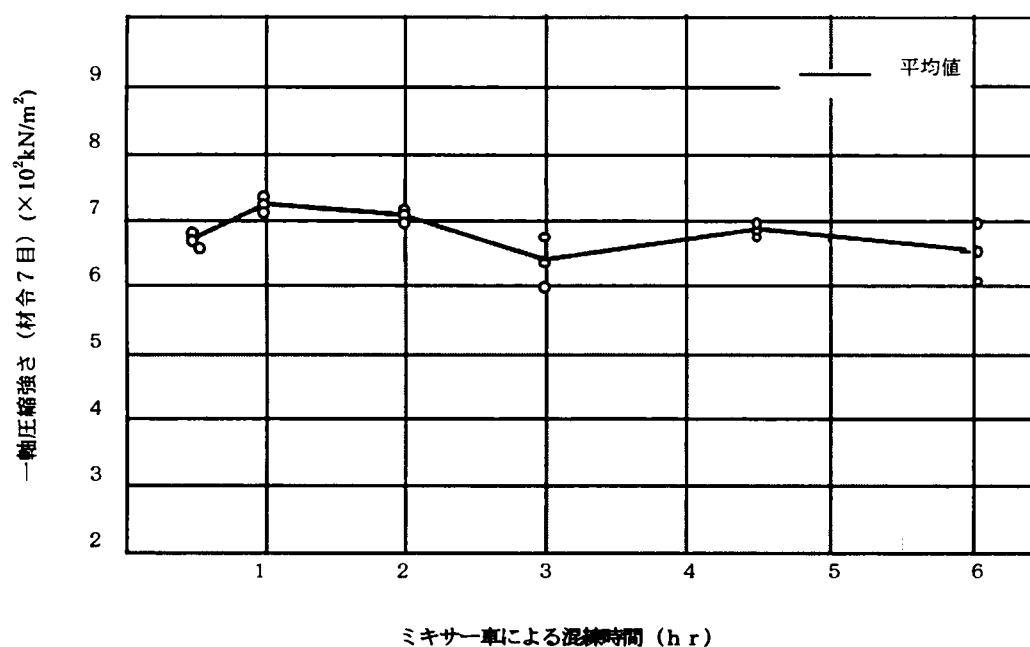


図 2-6 ミキサー車によるソイルモルタル混練時間と強度の関係

(2) 定置式流動化処理工法との比較

表2-4にReSM工法と従来の定置型プラントによる流動化処理土工法の特徴を、上に述べた点を含め整理した。

表2-4 ReSM工法と定置型プラント方式の比較

項目	ReSM工法	定置型プラント方式
ストックヤード・プラント設置場所、設備等	直接、発生現場から埋め戻し現場へ、改造ミキサーで運搬。大規模な現場プラントやストックヤード等大きな用地は不要。	発生現場からストックヤードに発生土を運搬し定置型プラントにより処理後、さらに埋め戻し場所へ運搬。大きな敷地が必要。
処理装置	移動型・小型	定置型・大型
計量装置	セメント・水のみ計量。土砂はミキサー車のドラム内泥水水位で計量するため、土砂計量装置が不要。(セメント・水は近くの生コン会社で供給することで計量装置が全く不要となる場合の可)	セメント、水、土砂の計量が必要。
処理能力	改造ミキサー車(容量 5.5m ³)の台数増減により対応。打設手間待ちまで含めて1日約 30m ³ /台が目安(ミキサー車による ReSM 製造時間は数分間。残りは土砂・セメント・水投入時間及び打設時間、打設待ち時間、運搬時間等)。ミキサー車の増減により規模に関わりなく処理量の変動に柔軟に対応できる。	大容量で処理が原則。需給のバランス対応するため、プラントやストックヤードが課題となり、固定費が掛かる。
装置トラブル	故障はほとんどなし。万一、トラブル・破損があっても修理は容易・簡便で、当日打設分は代車により打設可能のため工程への影響なし。	故障時には全供給が停止
その他装置	基本的に不要	調泥装置が必要
運送距離	(相対的に)短い	(相対的に)長い
処理対象土砂の種類	ミキサー車1台に投入される土砂は一工区からの発生土(土砂の性状把握・管理が容易)	多様な発生土がストックヤード内で混在(土砂性状管理が難)
礫の混入	礫径約 10cm の礫・異物が混合していても混合可能	礫径 4cm 以下になるまで発生土を分別・ふるい作業を行う
流動性	高い	(ReSM に比べて)低い
ブリージング	目標 2%以下	1%以下
打設装置	モルタルポンプ、スクィーズポンプ	コンクリートポンプ車
利用発生土	発生土は現場毎に製品化し、有効利用するので、原則として他現場からの搬入はない。	他の現場からの建設発生土を搬入する場合も多い
管理値	泥水単位体積重量、ブリージング、流動性(フロー値)、一軸圧縮強さ(コーン貫入試験)等	同 左
測定場所	供給側(製作時)および需要側(打設時)ただし、生コンと同じでいずれも納入側が行う。	プラント (処理土製造時の強度管理)
強度のバラツキ	ほぼ均質な土構造物の構築可能 (ミキサー車1台単位で配合変更可能のため、試験結果が目標値を満たさない場合にも最適な配合変更によるフィードバックにより強度管理が可能)	強度のバラツキは ReSM よりも大きい
透水係数	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁸ cm/s(粘性土を利用した場合)	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁷ cm/s

(3) ReSM工法の適用分野

ReSMは様々な分野に適用可能ということであるが、本論文では、これらの適用分野のうち下記表2-5でアンダーラインをした代表的なものに関し、実際の適用例や今後の適用の可能性とその考え方について本論文の対象としている。

表2-5 ReSM工法の主な適用分野

分野	適用場所	特徴・目的	目標強度
埋戻工	<ul style="list-style-type: none"> ■<u>地下鉄駅舎</u> ■共同溝 ■シールド立坑 ■地中埋設管 ■狭隘空間 ■道路・滑走路等補修 等	<ul style="list-style-type: none"> ○現場内の発生土を再利用できる ○完全充填可能 ○沈下はほとんど無し ○地下水による流出無し ○液状化しない ○流し込むだけで埋め戻し完了 (施工性に優れている) 等 	低強度 ～中強度
埋立工	<ul style="list-style-type: none"> ■<u>海面埋立</u> ■護岸修復 ■崩壊箇所盛土修復 等	<ul style="list-style-type: none"> ○浚渫土を有効利用できる ○埋立完了時点で必要な強度確保 ○沈下はほとんど無し ○他の地盤改良工の必要無し ○液状化しない ○施工性に優れている 等 	中強度
基礎工	<ul style="list-style-type: none"> ■建築基礎 ■<u>タンク基礎</u> ■埋設管受防護工 等	<ul style="list-style-type: none"> ○沖積～洪積粘土程度の地盤反力係数を有しているため基礎地盤として最適 ○沈下はほとんど無し ○充填性に優れている ○施工性に優れている 等 	低強度 ～中強度
補強工	<ul style="list-style-type: none"> ■裏込工 ■<u>盛土(スーパー堤防)</u> ■補強盛土 等	<ul style="list-style-type: none"> ○自硬性材料であるため土圧が働かないような構造をとることも可能 ○サンドイッチ構造などとして盛土補強可能 ○ジオテキスタイルなどの補強材を併用することにより高盛土補強が可能 ○礫・玉石などを敷き並べ充填することで高い補強性をもつ層形成可能 ○充填性に優れている 等 	低強度 ～中強度
遮水工	<ul style="list-style-type: none"> ■調整池 ■<u>最終処分場</u> ■構造物周りの鉛直遮水工 ■海面埋立処分場の護岸部充填材 等 	<ul style="list-style-type: none"> ○遮水性に優れている ○下地処理に最適(シート破損の可能性が小さい) ○充填性に優れている ○発生土・浚渫土などの有効利用が可能 等 	透水係数 10^{-6}cm/s 以下
充填工	<ul style="list-style-type: none"> ■<u>廃坑</u> ■空洞 ■調査坑 ■岩盤亀裂充填 等	<ul style="list-style-type: none"> ○充填性に優れている ○施工性に優れている ○地下水による流出無し ○降雨浸透を抑止できる ○周辺地盤と一体化できる ○空洞内の廃泥を再利用できる遮水性に優れている 等 	低強度 ～中強度

注) 低強度(人力掘削可): 1000kN/m^2 まで、中強度(機械掘削可): 数 1000kN/m^2

2.2.4 表層遮水層工法

廃棄物最終処分場において、周辺地盤へ埋立てした廃棄物から有害物質が溶出するのを防ぐために遮水工の設置が必要である。遮水工には、矢板や連続壁によって水平方向の流れを止める鉛直遮水工と、鉛直方向の流れを止める表面遮水とがある。ここでは、後者の表面遮水にReSMソイルモルタルを利用する考え方について、その概要を整理しておきたい。

(1) ReSM工法の適用性

これまでも述べてきたように、ReSM工法は、粘土塊を粉砕するよう改造したミキサー車に水、固化材（セメント）および建設発生土を直接積み込み、ドラム内の特殊な羽根とピアノ線弦で攪拌した、流動性と自硬性を併せ持つソイルモルタル材料を高流動状態で打設し、目的に応じた強度の均質な人工地盤として再構築するものである。この人工地盤は任意の強度を有しており降雨・流水に対する耐浸食性を有している。また、粘性土分を含む沖積～洪積層からの発生土を有効利用したソイルモルタルとしての透水性は、 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$ の範囲にあり、粘性土と同等の難透水性をもっている。

例えば、廃棄物の最終処分場において防水シートの基盤として人工粘土層（粘性土ライナー）に求められる遮水条件は、透水係数 10^{-6}cm/s 以下、厚さ 50cm 以上であり、遮水材料としての条件を満たしていることから、ReSM工法の特色を生かした新しい仕組みを模索するものである。

一般に人工遮水層を構築する方法としては、(1)良質な粘性土を購入して転圧する方法、(2)アスファルト等の吹き付けによる方法、(3)ベントナイト遮水層を構築する方法、(4)現地発生土と固化材（セメント等）および添加材（ベントナイト等）の混合土を転圧して遮水層を構築する方法、(5) ReSMのような塑性流動化したソイルモルタル材料で遮水層を構築する方法などがある。

ReSM遮水工法は、従来の遮水工法、特に土系材料を利用した遮水工法と比較して表2-6のような特長を有している。

このうち粘性土のみの転圧の場合を除いて、遮水性や強度面では土質材料、セメントおよび水の配合により所定の品質を確保できるが、流動化処理と転圧処理という視点で比較した場合、以下のような利害得失が指摘される。

- ① 水平面での施工については、転圧処理のメリットは大きいですが、ある程度以上の勾配をもつ斜面部での施工に課題が多い。
- ② これに対し流動化処理の場合は、斜面については後述のように様々な方法で遮水層の構築が可能で、水平面でももちろん問題はない。
- ③ 転圧処理に対し流動化処理の場合は、相対的に含水量が多く（とくにReSMソイルモルタル）、乾燥収縮等によるひび割れ対策が重要となる。

表2-6 各種遮水工法の比較

項目	流動化処理		転圧処理		
	固化材混合		固化材混合		固材混合なし
	R・S・M遮水工法	流動化処理土 (定置型プラント方式)	ベントナイト 混合土転圧	安定処理	粘性土転圧
ストックヤード、プラント設置場所、設備等	直接、発生現場から埋め戻し現場へ、改造ミキサーで運搬。大きな用地が不要。	発生現場からストックヤードに発生土を運搬し定置型プラントにより処理後、さらに埋め戻し場所へ運搬。大きな用地が必要。	発生土にベントナイトを混合し重機転圧により遮水層を構築	発生土にセメントを混合し重機転圧により遮水層を構築	粘性土を重機転圧により遮水層を構築
処理装置	移動型・小型	定置型・大型	定置型・大型	定置型・大型 ～移動型・小型	定置型・大型 ～移動型・小型
処理能力	改造ミキサー車（容量5m ³ ）の台数増減により対応	大容量で処理	混合プラントにより処理	原位置混合・混合プラント両者可能	原位置混合・混合プラント両者可能
流動性	高い	(R・S・Mに比べて)低い	-----	-----	-----
ブリージング	2%以下	1%以下	-----	-----	-----
施工性の特徴	小規模な工事や処理量の変動に柔軟に対応できる	大規模な処理に適している	大規模な処理に適しているが斜面勾配が大きいと施工できない場合がある・含水比管理が難しい等	小規模から大規模な処理に適しているが斜面勾配が大きいと施工できない場合がある	大規模な処理に適しているが斜面勾配が大きいと施工できない場合がある
一軸圧縮強さ	低強度～中強度	低強度～中強度	低強度	低強度～中強度	低強度
遮水材料としての課題	流動化材料の配合設計及び施工管理が重要	流動化材料の配合管理方法が重要(現時点では遮水層としての配合管理方法は見いだされていない)	均一な転圧管理が難しい・吸水膨張により盤膨れが生じやすい・施工性が悪い	遮水材料としての保証無し	均質材料の入手困難・均一な転圧管理が難しい
透水性(材料)	10 ⁻⁸ cm/s以下	10 ⁻⁷ cm/s以下	10 ⁻⁸ cm/s以下	10 ⁻⁸ cm/s以下	10 ⁻⁸ cm/s以下
透水性(遮水層)	10 ⁻⁷ cm/s以下	10 ⁻⁵ cm/s以下?	10 ⁻⁶ cm/s以下	10 ⁻⁵ cm/s以下?	10 ⁻⁷ cm/s以下

(2) 斜面表層遮水層構築工法の考え方

上記のように、R・S・Mソイルモルタルを廃棄物処分場の表層遮水層（粘性土ライナー）として利用する場合には、高含水比によるひび割れの問題と、斜面施工時の問題とがあることが分かる。

このうち後者については、R・S・M遮水工法は流動性の高いソイルモルタルを用いるため、底盤等水平部への施工性は優れているが、斜面に一定厚さで遮水層を構築することは、種々の要因が関係すると考えられ、課題が多いと予想される。

斜面施工法としては

- ① 薄膜状に自然流下させ、複数層重ねて遮水層を構築する
- ② 上面に型枠を設置して流し込む

- ③ 層厚の調整できる布袋に流し込む
- ④ 斜面から流下しない程度まで流動性を低下させた塊を一定密度に転圧する
- ⑤ 吹き付けを繰り返すことにより一定厚さの遮水膜を形成する

などの方法が考えられるが、これらの施工時の課題と解決方法の可能性を探る必要がある。

2. 2. 5 軽量土埋立て工法

海面の埋立てや護岸土留め背面の埋戻しなど、海工事では山砂が用いられることが多かったが、埋立て材料そのものの重量による海底地盤の沈下や、土留め背面の土圧が問題になるケースも多い。また、それらの材料は、締め固めや均等係数にもよるが、液状化しやすく地震に対する対応が必要となる。さらに、環境問題面でも山砂の採取による自然環境破壊という課題も大きい。

本項で提案するのは、これらの課題を解決する手段として、浚渫土や陸上現場の発生土を用いたソイルモルタルに気泡を混合し軽量化するとともに、山砂等砂質土の持つ欠点を補おうとする工法である。海工事に付き物の浚渫土砂は、第1章でも述べたように細粒分が多く、建設泥土に分類されるケースも多いが、粘性土の含有率も高いことからソイルモルタルに適した発生土といえる。このように浚渫土を用いての埋立てや護岸土留め背面への埋戻しといった海工事への適用以外にも、埋設物周辺への埋戻しや、軟弱地盤上での盛土、擁壁背面の埋戻し等、その軽量性を利しての適用範囲は広く、これまでも述べてきたReSMとの併用なども考えられる。

以上のような観点から、この気泡混合軽量土を用いての工法を、軽量ReSM工法と称して、研究の対象に加えており、その成果として本章2. 7で述べる浚渫土を用いた基礎実験や、第3章3. 4で述べる軽量ReSM工法によるトンネル空洞充填工事实績などがあげられる。

2. 3 粘土注入工法の研究開発¹²⁾

2. 3. 1 大阪粘土の注入材としての適用性

注入材料としてローカルクレイを用いることが有用であるかどうか、粘土中に含まれる粘土鉱物の含有量と種類によって左右されることはすでに述べたが、土木技術者にとって興味ある注入の施工性、強度、止水性といった問題は、使用材料がローカルクレイである以上地域差は避けられない。したがって、岩田氏が関東ロームに関して得た諸データがそのまま大阪粘土に適用できるとは限らないし、とくにこれまでの研究が少ないことを考えれば、大阪粘土の採用にあたってかなり広範な室内実験および現場実験での検証を行う必要がある。

(1) 注入材適用研究の概要

図2-7は大阪粘土の注入材としての適用性に関する種々の室内実験を含めた、大阪粘土の注入材としての利用に関する一連の経緯を示したものである。このうち第1次現場実験以降については、次章の現場適用事例として述べることにし、ここではその注入材としての材料特性について言及したい。

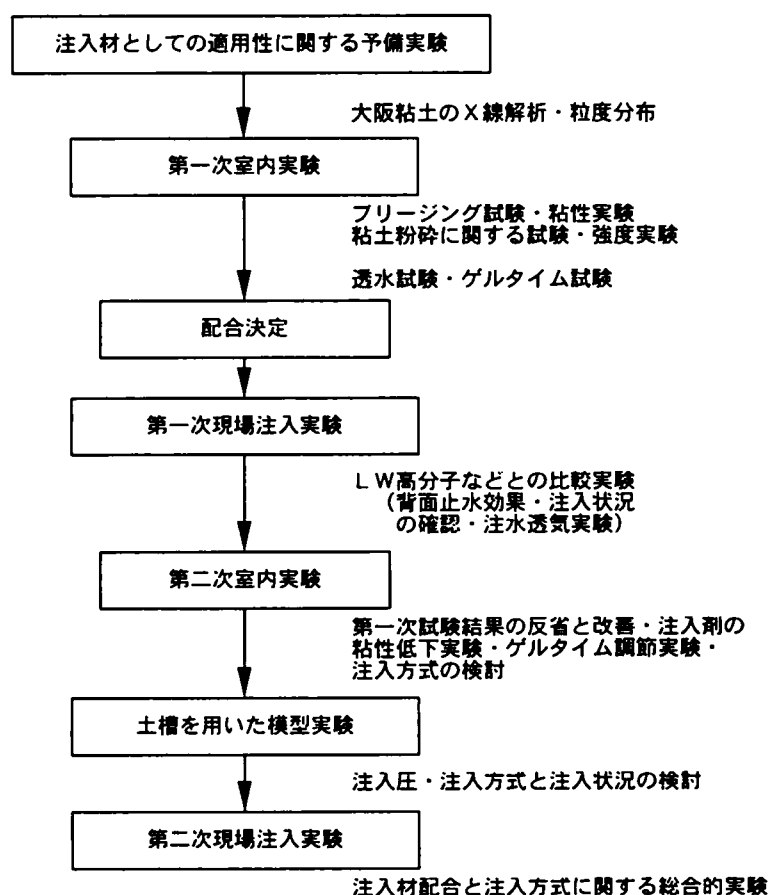


図2-7 大阪粘土の注入材適用実験の経緯

(2) 大阪粘土の特徴¹³⁾

粘土注入のもつ有用性のうちもっとも大きい点は、これまでの各種注入材に比べ材料費が安価であるという点であるが、これは前に述べたようないくつかの適合条件に合致した粘土が施工現場付近で、大量に得られるかどうかにかかっている。本章2.1にも述べたように粘土モルタルに使用する粘土は、モンモリロナイトが多いほど、また 2μ 以下の微粒分が多いほど有利となるが、粘土中に含まれる粘土鉱物の種類はX線回折により知ることができる。図2-8は大阪市旭区今市付近の沖積粘土と洪積粘土についての代表的なX線回折結果を示しているが、いずれも同一の鉱物組成を示しておりモンモリロナイト系であることが知られる。また粒度分布については図2-9に示すようにとくに洪積粘土は 2μ 以下が30%以上と多くなっている。このように大阪粘土は粒径の面でも活性の面でも粘土モルタルの材料としては適しているといえよう。

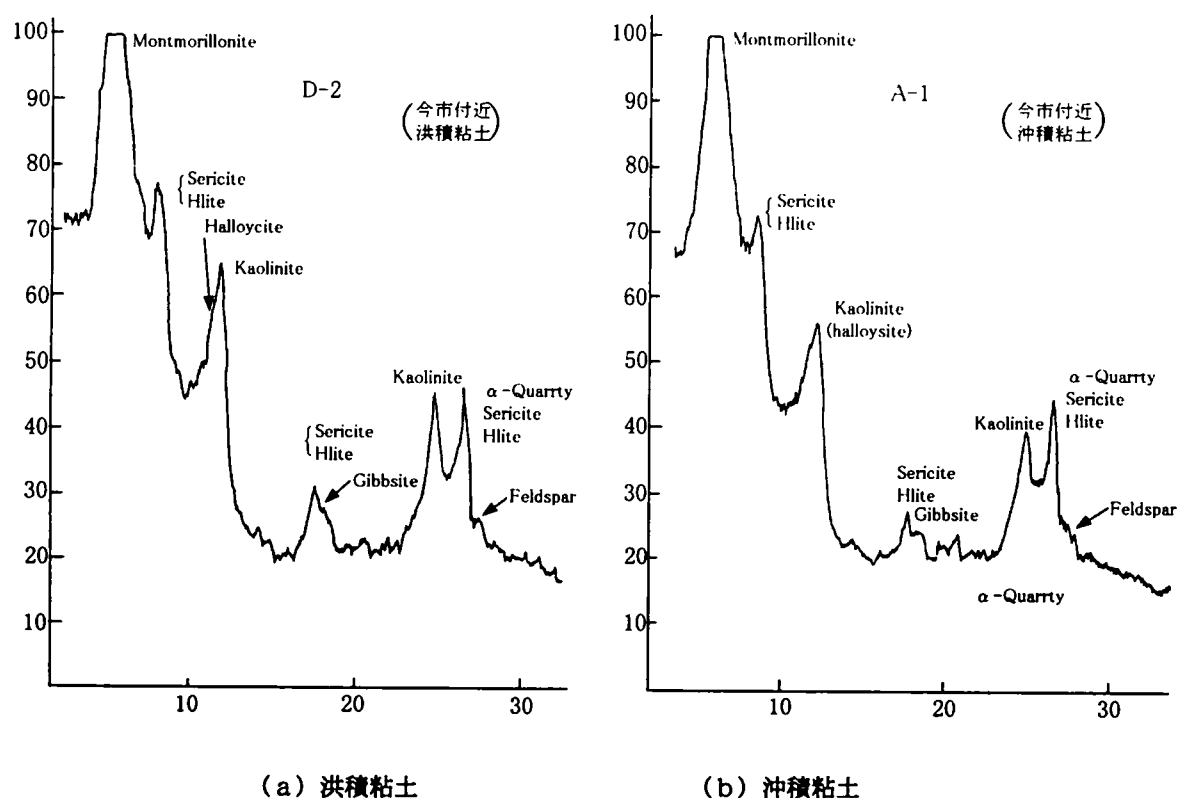


図2-8 大阪粘土のX線解析結果

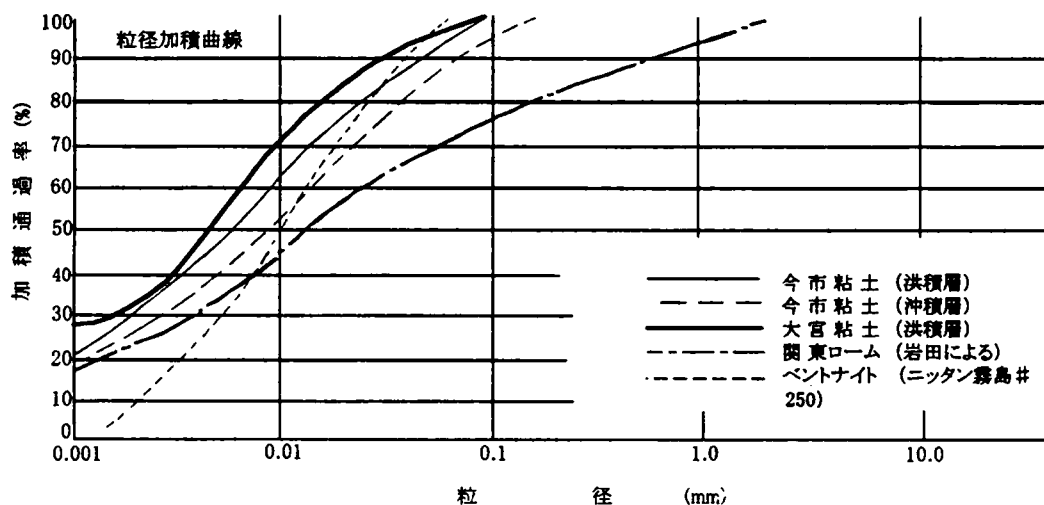


図 2-9 今市粘土の粒度分布

(3) 注入材としての適用性

岩田による研究でも指摘されているように、注入材料としてローカル粘土が適しているかどうかの条件として①ブリージング、②粘性、および③強度の3点が重要である。この3つの条件を満たす注入材に適した配合を見つけるために多くの室内実験を行った。

(a) 配合試験

配合試験は、粉碎された粘土液をベースにセメント、ベントナイトおよび水を種々の配合でミキシング、この混合液についてフロー試験、ブリージング試験を行い、さらにゲル化したものについて透水試験および一軸圧縮試験を実施した。また、配合試験の結果注入材として適切な条件を満たしたものに関して、標準砂を用いたサンドゲルを作成し、養生期間を変えて透水試験および一軸圧縮試験を行った。

以上の各試験について流れ図を図2-10に示した。なお使用粘土は、2.1で述べた洪積粘土に相当するものとして、筆者の関係者が施工を担当していた大宮高層住宅現場でアースオーガーにより採取されたものを用いた。この粘土試料についてもX線回析を行ったところ、図2-8に示したものと同様の結果を得ている。またベントナイトはニッタン霧島(#250)を、セメントは宇部普通ポルトランドセメントを使用した。これらの粒度分布は図2-9に併記した通りである。

なお、いまひとつの重要な要素である粘土の粉碎については、項を改めて述べることにする。

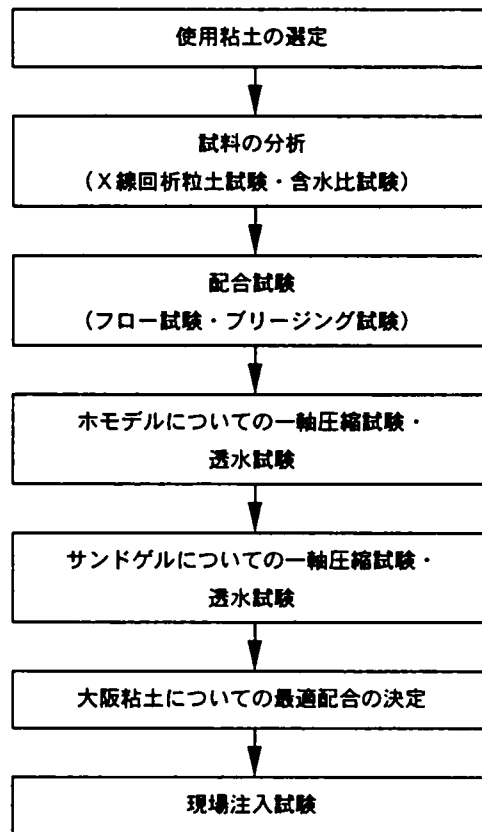


図 2-10 粘土注入実験流れ図

(b) 適正配合因子と組合せ

配合による注入材の特性に影響を与える諸因子は次のとおりである。

$$\text{水比} = \frac{W}{C+L+B}, \quad \text{セメント比} = \frac{C}{C+L+B}$$

$$\text{ベントナイト比} = \frac{B}{L+B}, \quad \text{粘土比} = \frac{L}{L+B}$$

岩田の行った関東ロームによる実験結果では、水比 2.5 の場合が注入材として好ましいといわれている。これに対し著者らが行った予備試験では水比が 2.5 以下ではきわめて粘性が大きくなり、注入材として適しないことが知られた。また先にも述べたように、大阪粘土はベントナイトの主成分であるモンモリロナイトが大量に含まれていることが確認されているため、ベントナイト添加量も少なくすむだろうことが予想された。このような点を考慮して表 2-7 に示すような水準を選定し、このすべての組合せ 100 ケースについて配合試験を実施した。

表 2-7 配合試験の水準

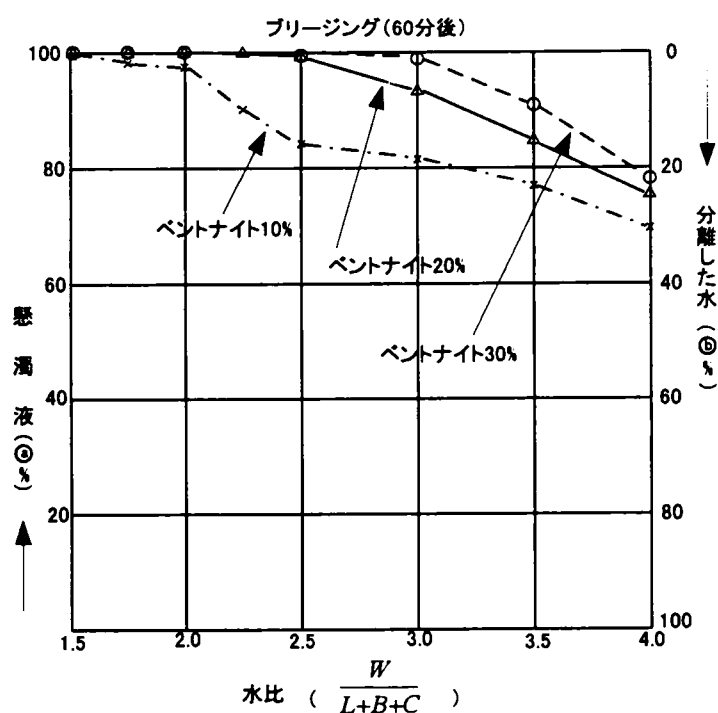
水比	セメント比	ベントナイト比	粘土比
2.50	0.1	0	1.0
2.75	0.2	0.1	0.9
3.00	0.3	0.2	0.8
3.25	0.4	0.3	0.7
3.50	—	0.4	0.6

(c) 物理的特性

粘土注入材の適正条件のうち、物理的特性であるブリージングと粘性（フロー値）は、その基本的な要因である。この2点については、以下のように大阪粘土が適正であるとの結果を得ている。

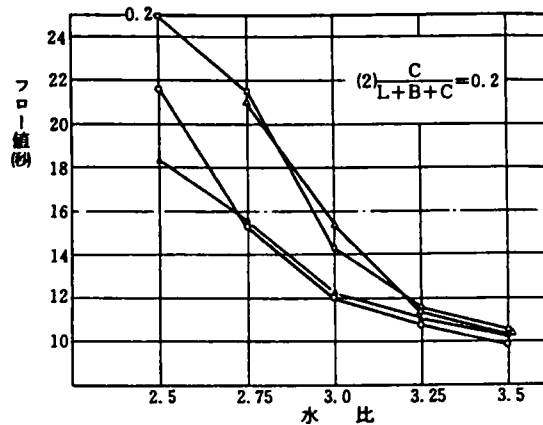
i) ブリージング試験結果

ブリージング量は各配合ともほとんどみられず、2時間後においてもブリージング率は1%に満たなかった。しいて傾向をみるならば、水比、セメント比および粘土比が大きいほどブリージングは生じ易くなっているが、いずれにしても実用上大きな問題となるものではない。これは、これまでも述べてきたように、使用粘土は粒子が細かくモンモリロナイトを主体としているため、懸濁液自体のチキソトロピックな性格が強いためと考えられる。このことは図2-11に示す関東ロームの例と比べれば一層明らかとなろう。

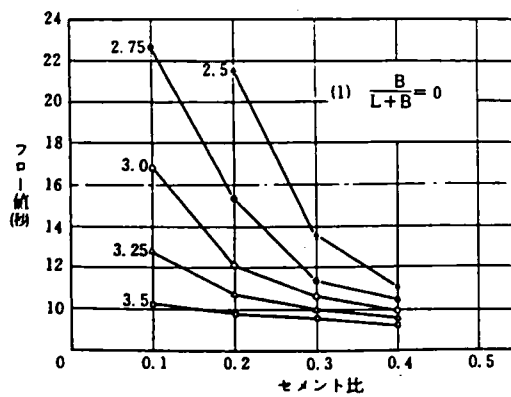
図 2-11 関東ロームのブリージング試験結果（岩田による）⁴⁾

ii) フロー試験結果

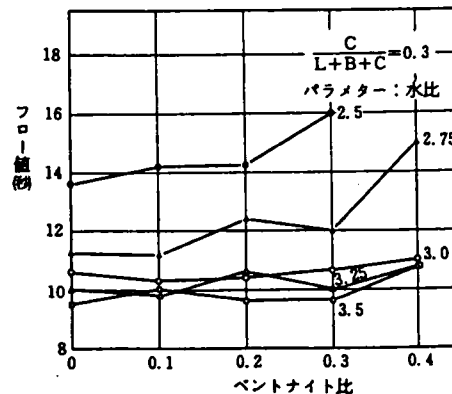
注入材が粒子間に隅なく充填されるためにはその粘性の低いことが一つの条件となるが、岩田によれば、実験的には懸濁液タイプの注入材に対しプロバクトフローコーンで16秒以上の場合は注入不可能であるとしている。今回の実験結果の代表例を図2-12に示しているが、粘性（フロー値）に粘土注入材の各因子が影響は以下の通りである。なお、水のフロー値は、水温によりいく分異なるが8秒前後である。



(1) 水比との関係 (パラメーター：ベントナイト比)



(2) セメント比との関係 (パラメーター：水比)



(3) ベントナイト比との関係 (パラメーター：水比)

図2-12 フロー試験結果の例

① 水比による影響

水比が大きくなると当然フロー値は小さくなるが、その減少の割合はセメント比が小さいほど大きくなることが知られた。

② セメント比による影響

セメント比がフロー値に与える影響としてセメント比が増大するとフロー値が減少するというはっきりとした傾向がみられる。このことは過大に混入されたセメントは、逆に粘土鉱物のチキソトロピックは性質を弱めることを示しており、注入材として粘性を低下させる必要のあるときは、ブリージングを生じない範囲でセメント量を増大させることが一つの方法となろう。

③ ベントナイト比による影響

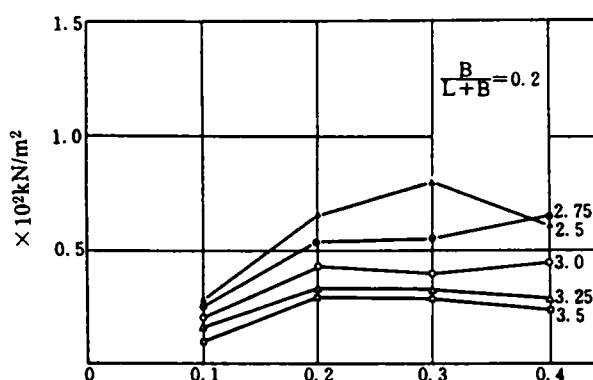
ベントナイト比が大きくなると粘性はやや大きくなるが、それは水比やセメント比の粘性に与える影響に比べはるかに小さいものである。

2.3.2 粘土注入材の強度・透水性状

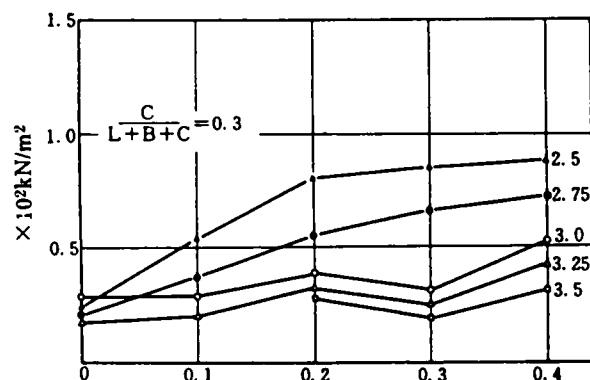
(1) ホモゲルによる試験結果

(a) 一軸圧縮試験結果

一軸圧縮試験結果のうち代表的なものを、水比をパラメーターとして整理し図2-13に示している。これによると、水比が増加すると当然強度は減少するが、セメント比は0.2以上ではほとんど強度に影響を与えない。これに対しベントナイト比が増加すると強度は増加し、その傾向はセメント比にかかわらず一様にみられる。通常モルタル等の強度は水セメント比で表すのが普通であるが、ベントナイト比0、0.2、0.4の場合の試験結果を水セメント比との関係で整理し、その包絡的な傾向を示したものが図2-14である。これによると強度増加に影響を与えるものは、①水セメント比の減少、②ベントナイト比の増加、③水比の減少の3点であることが明らかである。



(1) セメント比との関係



(2) ベントナイト比との関係

図2-13 一軸圧縮試験結果

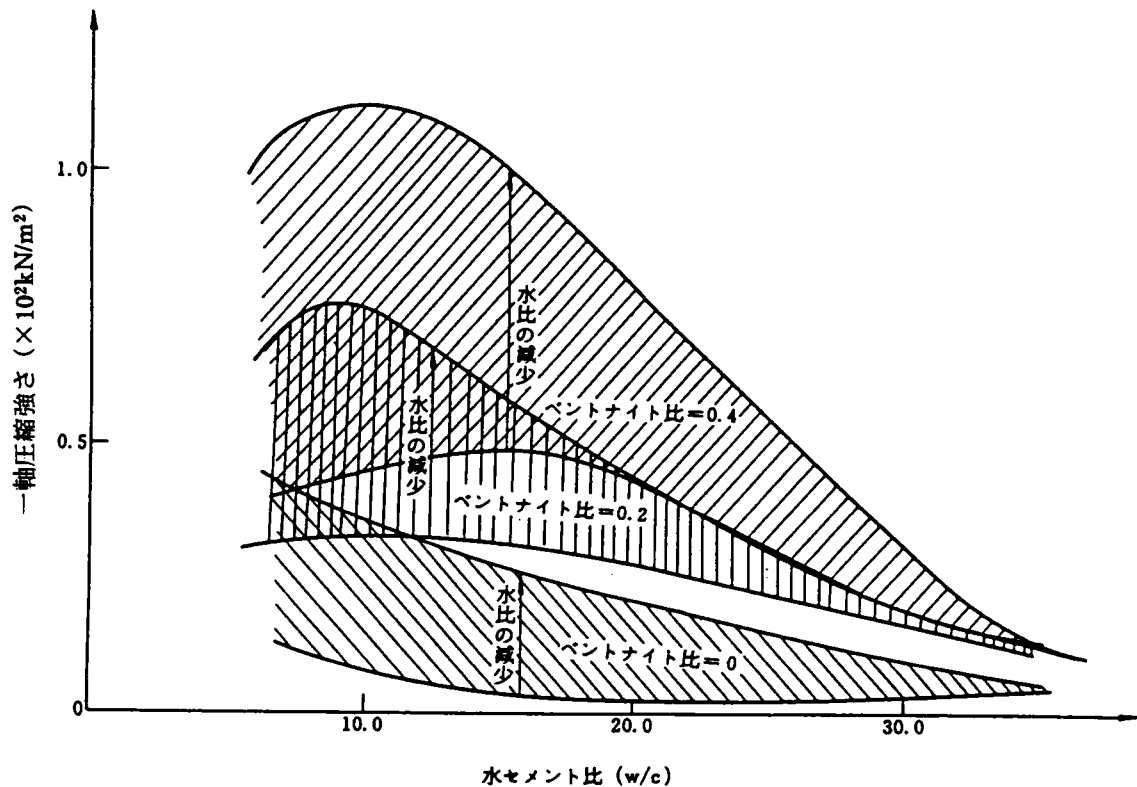


図 2 - 1 4 諸要素が強度に及ぼす影響

このうちベントナイト比が大きくなると強度が増加する点に関しては、通常ベントナイトなどの微粒分が混入することによりセメント硬化物の強度が減少する傾向にあるのに対し逆の結果となっている。これは実験に供したベントナイト（#250）が、図 2 - 9 の粒度分布にも示したように微粒分がむしろローカルクレーに比べ少ないためで、骨材的な役割を果たしているのではないかと考えられる。

(b) 透水試験結果

透水試験の代表的な結果を図 2 - 15 に示す。水比が透水係数に及ぼす影響は、セメント比に無関係に水比が増大すると透水係数も増大する傾向がみられる。ただセメント比が小さいとばらつきが大きく、固結物として不安定であることが知られた。

一方、セメント比およびベントナイト比と透水係数との関係では、セメント比が増大すると透水係数は増大し、ベントナイト比が増大すると逆に透水係数はやや減少する結果が得られた。しかし実用的には $1 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ とみてさしつかえなく、表 2 - 2 に示した関東ロームの場合とほとんど差がないようである。

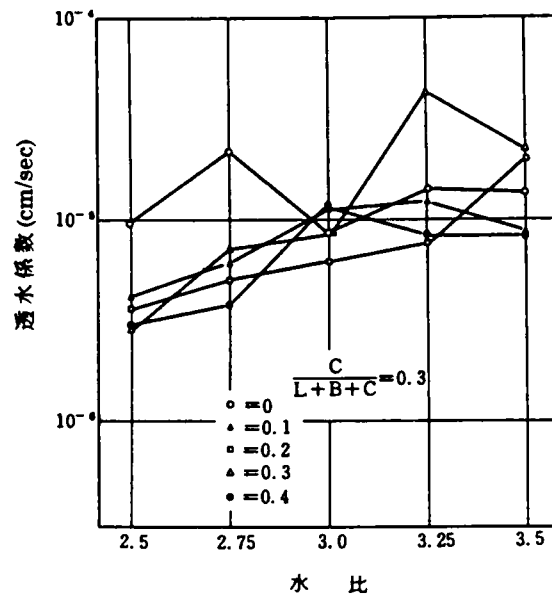


図 2 - 1 5 透水試験結果（水位との関係）

（２）サンドゲルによる透水試験および一軸圧縮試験

（１）に述べたホモゲルについての配合試験に対し、実際には注入された状態での強度、透水性といった諸特性が重要な問題となるが、実験室で地盤を再現し注入を行って試料を作成することは主として経費、労力の点から問題となり、数多くの配合について検討することには無理があるため標準砂を用いたサンドゲルについて透水および一軸圧縮試験を行った。

この試験に採用した配合は、配合試験により得られた結果から表 2-8 に示すにケースとした。供試体はミキシングされた注入材と表乾状態の標準砂とを練り混ぜて作成したが、その割合は標準砂の間隙率を $n=0.42$ として万遍なく注入された状態を想定して決定した。この供試体をホモゲルの場合と全く同様の手順で透水および一軸圧縮試験を行ったが、各配合について養生期間を 3 日、7 日、28 日の 3 通りに変化させ、それぞれ 2 個の供試体を試験に供した。

表 2 - 8 サンドゲル供試体の配合の組合せ

水比	セメント比	ベントナイト比	粘土比
3.0	0.3	0	1.0
3.25	0.4	0.3	0.7
3.5	—	—	—

図 2-16 は透水係数の、図 2-17 は一軸圧縮強度の養生期間との関係を示したものである。図からも明らかなように養生期間が長くなれば、透水係数は減少し、強度は増加している。図 2-18 は対応する配合についてホモゲルとサンドゲルとの比較を示しているが、ホモ

ゲルの強度が低いものほどサンドゲル強度の増加が大きくなっている。これはたとえホモゲルの強度が低くても、空隙に完全に充填された状態ではある程度の強度が期待できることを示しており興味深い。

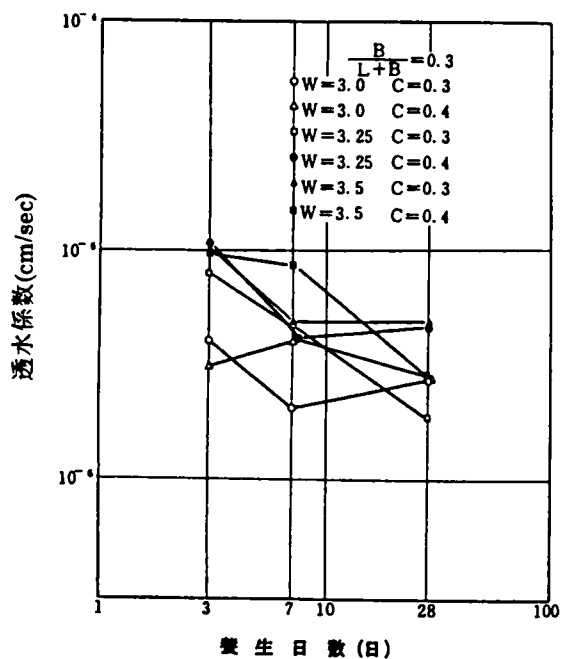


図 2-16 サンドゲルにおける透水係数の経時変化

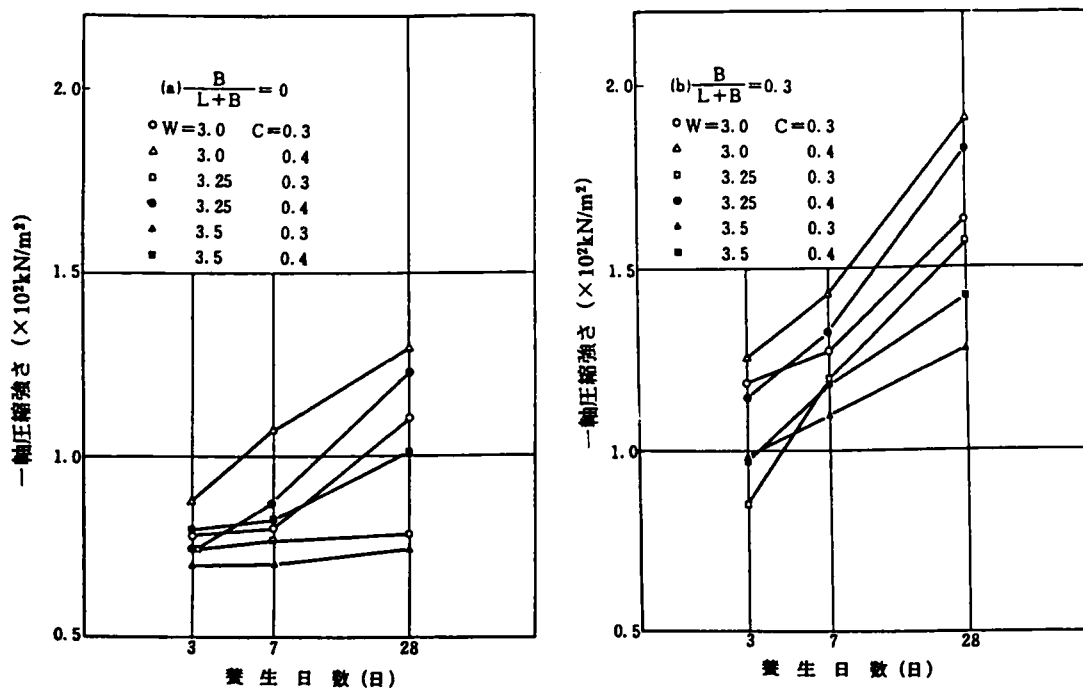


図 2-17 サンドゲルにおける一軸圧縮強度の経時変化

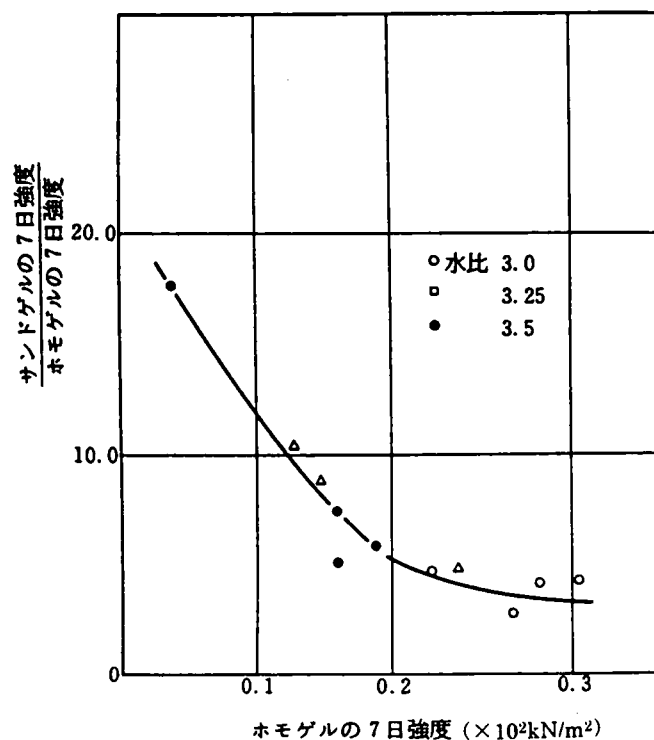


図2-18 ホモゲルとサンドゲルの強度比較

(3) 適正配合範囲の設定

大阪粘土はこれまで度々述べてきたように、電気化学的な特性が活発で、粘土注入の材料として適したものといえよう。したがってベントナイトを添加しない場合でもかなり高い粘性を有し、セメント比が0.4以下では、水比2.5以下の配合は注入材としては逆に粘性が高すぎる結果となっている。

大阪粘土を用いた最適な配合を決定するためには現場実験や数多くの実績が必要であろうが、今回の実験からみる限りでは、止水目的の場合には水比を大きくし、強度改良目的の場合には水比を小さくして、セメント比を大きくすることにより適切な粘性を保つことができる。ここでは1つの目安として表2-9の配合を提案したい。

表2-9 注入の目的と適正配合範囲

目 的	水 比	セメント比	ベントナイト比
止 水	2.5～3.5	0.2～0.4	0～0.3
強度改良	2.0～2.5	0.3～0.5	0～0.3

そして実際の使用にあたっては、その地域地域のローカルクレイについてX線解析と粘度分析から今回のデータを参考に、目的に応じた数ケースの実験を行えば適切な配合を見つけることができると考えられる。

2. 4 粘土モルタル遮水壁工法の研究開発¹⁴⁾

2. 4. 1 地中連続壁工法への適用

粘土モルタル遮水壁工法には表2-3にも示したように、柱列杭工法と地中連続壁工法とが考えられるが、基礎的実験は後者の地中連続壁方式に主体を置いて行った。この地中連続壁方式は、さらに①置換方式、②泥水混合方式、および③泥水モルタル方式に分けられる。これらはいずれも粘土泥水や粘土モルタルを安定液として使用することになるので、安定液としての適用性と、最終的に出来上がった粘土モルタル壁の強度等諸特性とが問題となる。

(1) 置換方式に関する実験

3つの方式のうち、置換方式は通常のパントナイト泥水の代わりに粉砕された粘土泥水を安定液として使用し、掘削完了後別途配合・製作された粘土モルタルと置き換える方式であるので、その適用に関する検討は、安定液および強度等諸特性について以下の(2)「泥水混合方式に関する実験」に準じるものであるため、ここでは詳述しないが、最も一般的に用いられる方式である。

(2) 泥水混合方式に関する実験

(a) 安定液試験

地中連続壁工法に用いる壁面の安定液は表2-10に示す諸条件を満たす必要があり、各項目についてそれぞれ試験法が決められている。実験は大阪層群の洪積粘土である武庫川粘土を主体として行ったが、その粒度分布は今回の実験に関係のある他の各種粘土とあわせて図2-19に示した。

表 2 - 1 0 安定液としての条件と試験法

安定液としての条件	試 験 法
重力に対する安定性	ブリージング試験
壁面安定に必要な比重	比重試験
適当に大きな粘性	ファンネル粘性試験
すぐれた造壁能力	ろ過試験
適当な浸透半径	水槽試験

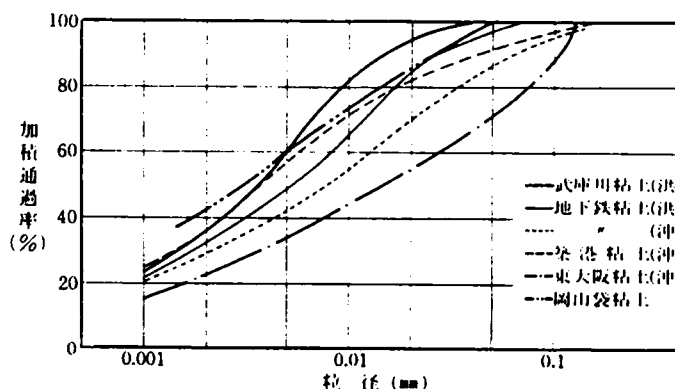


図 2 - 1 9 使用粘土の粒度分布

i) 重力に対する安定性

粉碎した粘土泥水を適度に薄めて 1,000cc をメスシリンダーにとり、10 時間以上静置した状態でのブリージング水を計量した。その結果、泥水比重 1.108～1.236 の範囲で最大 1.5% と小さく問題はない。また、ブリージング試験完了後安定液の上部 1/3 と下部 1/3 を比較したが、ほとんど差異はなかった。

ii) 壁面安定に必要な比重

孔壁が安定であるためには、土圧、水圧に抗するだけの安定液比重が必要となるが、本方式によ粘土モルタルの場合には安定液自身が壁材の一部となるため、壁材の強度などからも制約を受けることになる。図2-20は武庫川洪積粘土と築港沖積粘土についての含水比と比重の関係を示したものである。これにより、大阪粘土の土粒子比重は $G_s=2.875$ 前後であることが確認された。

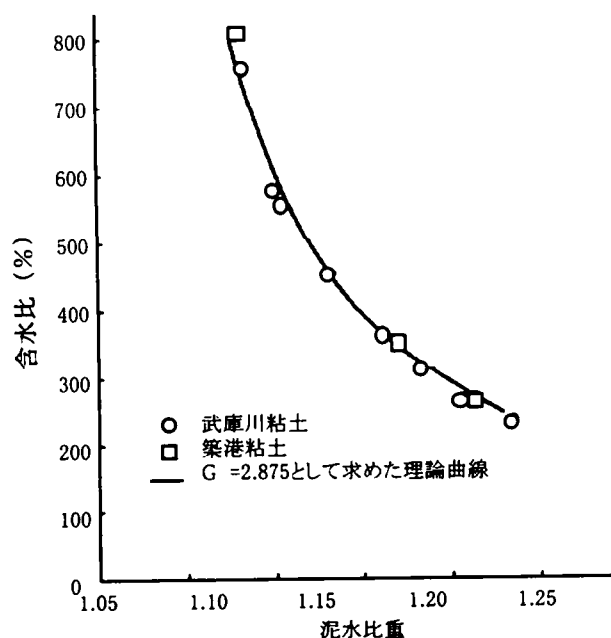


図 2 - 2 0 泥水比重と含水比の関係

iii) 適度の粘性

安定液の条件のなかで最も重要な項目の一つで、粘性が大きいほど安定液として有効となるが、施工性についてはその逆となる。粘性の定量的指標の一つであるファンネル粘性について、各種条件での泥水比重と粘性との関係を示したものが図2-21である。これによると、粘土液のみの場合比重 1.2 で通常必要とされる 30 秒前後の値となっている。もちろん製品としてのベントナイトだけの場合に比べ、同じ比重に対しての粘性は非常に低くなっているが、逆にこの点が粘土モルタルにとって有利な点となる。また、小さな比重で相当の粘性が必要な場合には、CMC の添加が有効であるが、ベントナイトの添加は逆に粘性を下げる働きもあることが知られた。

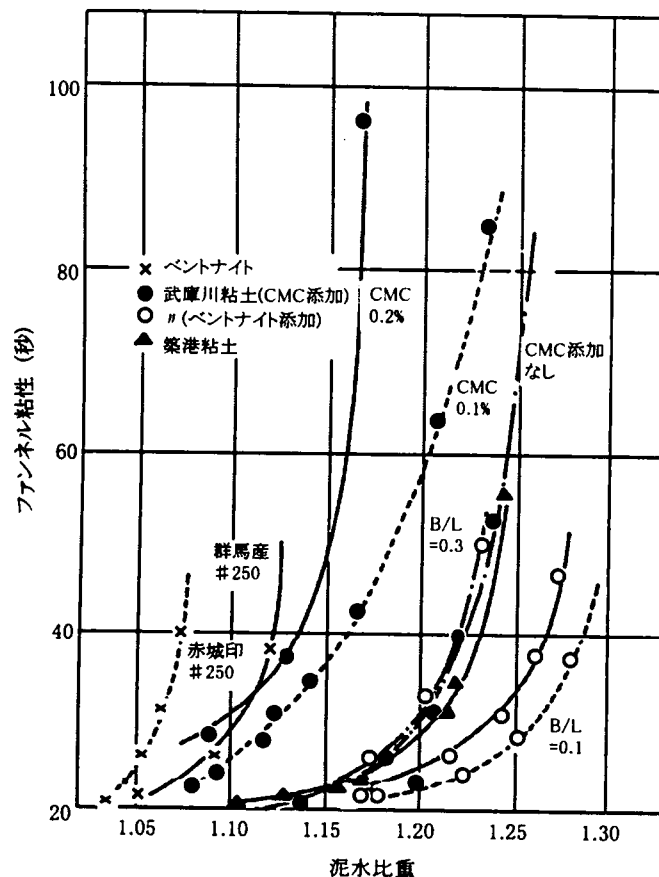


図 2-21 泥水比重と粘性の関係

iv) 造壁能力

安定液としての泥水は、単に比重によってのみ壁を安定させるのではなく、地盤への泥水浸透時にその濾過によって造成される薄膜（マッドケーキ）の寄与する点も大きい。これを調べる試験として濾過試験がある。図2-22は、圧力 300kN/m^2 、脱水時間 30 分におけるケーキ圧と脱水量との関係を示しているが、当然通常のベントナイト安定液に比べかなり大きな値となっている。ただ最終目的が本体構築などでなく遮水壁築造であるので、その厚さは大きな問題とはならない。

v) 適当な浸透半径

安定液中の微粒子が掘削孔壁面から地盤内に浸透してゲル化し、地盤の土粒子を連結して地盤を安定化させ、また安定液の逸水を防止することが知られている。このことを前記 iv) とあわせて模式的に示したものが図2-23(b)である。図2-23(a)はこれを実証する実験の要領を示しているが、その水槽は $30\text{cm} \times 45\text{cm} \times 30\text{cm}$ を使用した。泥水の比重は 1.205 および 1.245 の 2 ケースについて行ったが、背面土部に注水を行うケースも含めて、いずれも良好な結果を得た。写真2-1は水槽実験の状況を示している。

以上 i) ~ v) に述べたように粘土粉碎泥水は、地盤中の遮水壁築造に関して、実用的に安定液として使用しうるとの確信を得た。

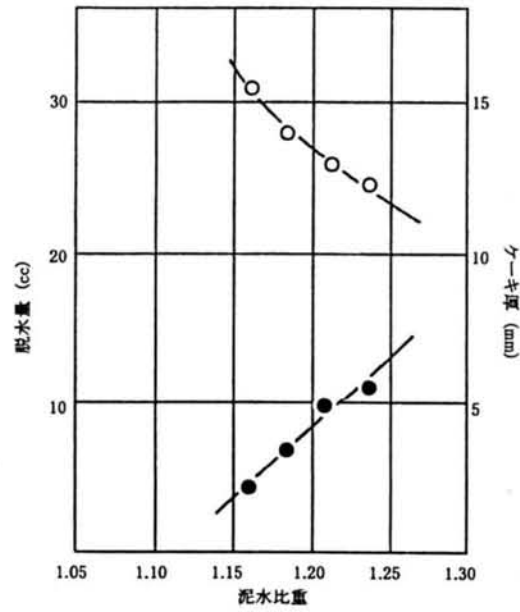


図 2-22 濾過試験結果

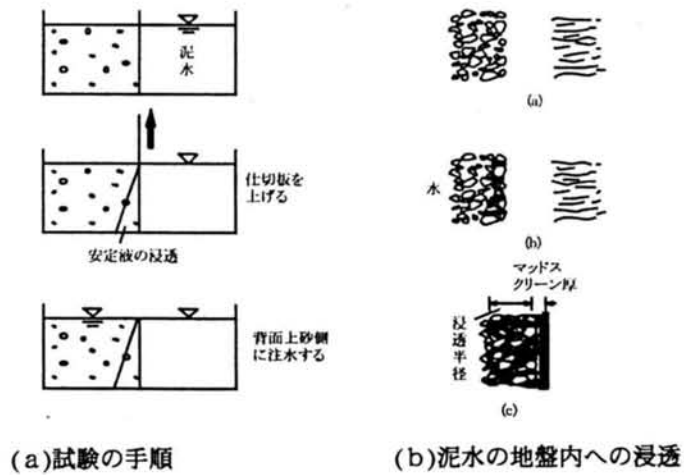


図 2-23 泥水壁面安定試験

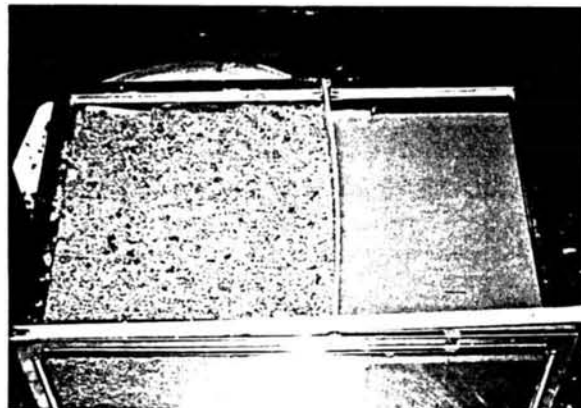


写真 2-1 水槽実験状況

(b) 配合試験と粘土モルタルの諸特性

泥水混合方式は、上述の粘土泥水安定液で掘削したのち、モルタルを圧送、地中で泥水と混合して粘土モルタルを作成する方法なので、泥水とモルタルとの混合物（粘土モルタル）の諸特性が重要となる。粘土モルタル遮水壁の目的は、2. 2. 2(1)でも述べたように地盤と同程度の特性を持つ遮水層を人工的に作ることである。実験はまず 300kN/m^2 程度の一軸圧縮強度を有する配合を見つけ出すことから始めた。

i) 強度・変形特性

配合試験は、粉碎した粘土泥水の比重を変化させ、 $W:C:S=1:2:2$ および $1:3:3$ の2種類のモルタルを、重量比でモルタル：粘土泥水 $=1:2$ の割合で混合するという方法をとった。粘土の粉碎は、粘土注入の場合と同様ボールミルタイプの粉碎機によった。また、砂は豊浦標準砂を絶乾状態換算で、セメントは普通ポルトランドセメントを、それぞれ使用した。

図2-24、25はベースとなる粘土泥水の比重を変化させた場合の、泥水比重と一軸圧縮強度および変形係数との関係を示している。この結果から、粘土泥水比重を1.2、モルタル配合を $1:2:2$ の場合を標準配合としたが、水中養生1週間での強度が約 250kN/m^2 、変形係数が約 60000kN/m^2 である。

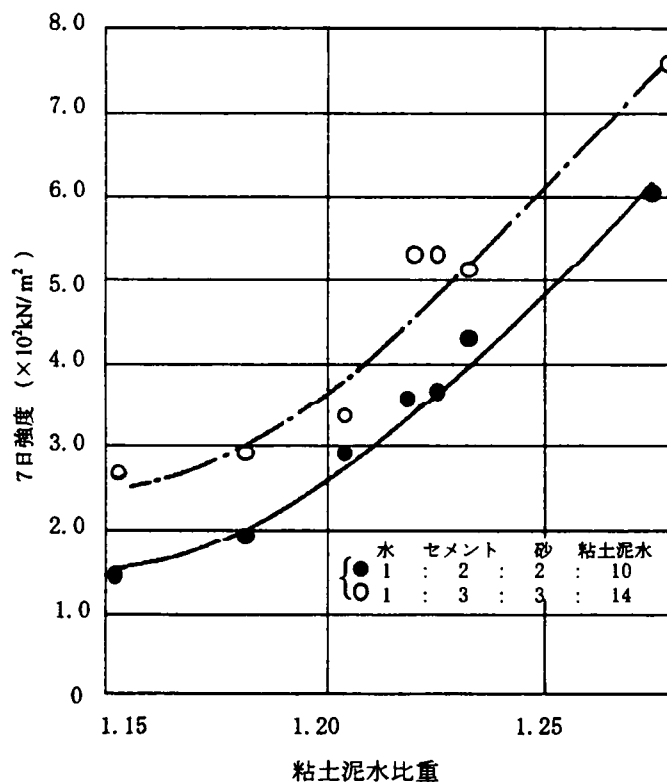


図2-24 粘土泥水比重～強度の関係

一方、図2-26は標準配合の強度と養生日数との関係を示しているが、使用砂を現場の条件に合わせて表乾状態のものを使用しているため、1週間強度 180kN/m^2 と小さくなっているが、28日では約 300kN/m^2 と目的の強度を発現していることが知られる。

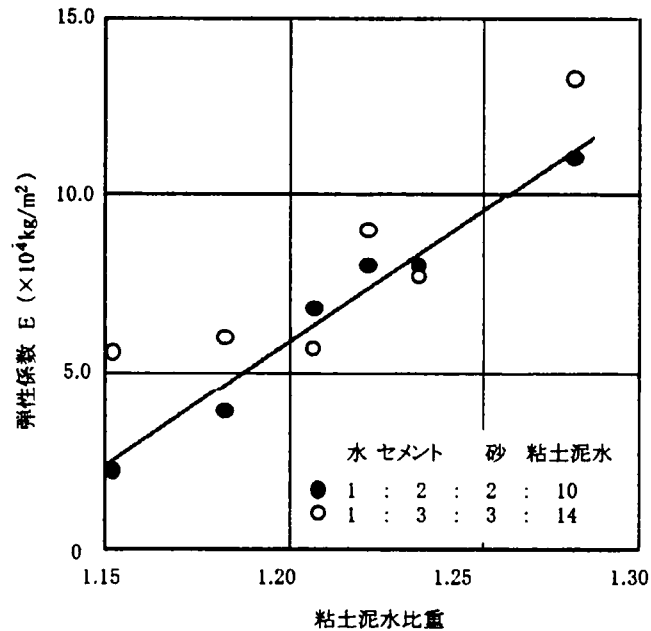


図 2 - 2 5 粘土泥水比重と変形係数の関係

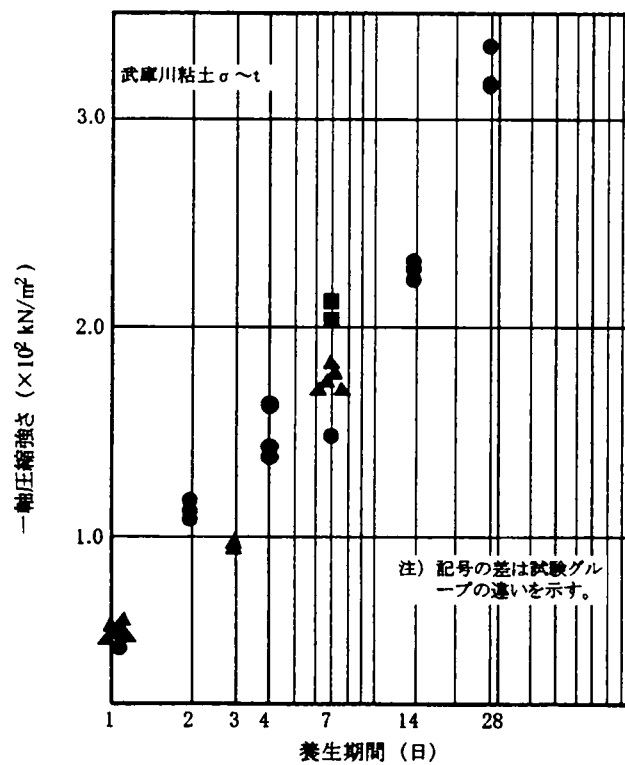


図 2 - 2 6 標準配合の強度特性 (砂: 表乾状態)

ii) 圧密・透水特性

粘土モルタルは含水量も多く、粘土分を多く含むので圧密現象に対する検討も重要となる。標準配合の1週養生について圧密試験を行った結果を大阪層群洪積粘土との比較で表2-11に示しているが、これらによると圧密特性は全体的にみて洪積粘土に近く、圧密降伏応力も 500 kN/m^2 であるので硬化後の圧密沈下についても問題はないと言えよう。

つぎに透水係数については、高压窒素ガスを用いた定水位法によれば、同じく1週養生で平均 $3 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ となった。これは表2-11に示す圧密試験時の値 $3.3 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ に比べ2オーダー大きい、これは試験法の差によるもので、高压ガスを用いての透水試験では大きく出ることが予想されることから $10^{-7} \sim 10^{-8}$ オーダーと考えてよいだろう。

表2-11 粘土モルタルの力学特性

力学特性値	粘土モルタル (標準配合)	洪積粘土 (大阪層群)
圧密降伏荷重(7日) [kN/m^2]	490	100
初期間隙比(7日)	3.1	1.4
圧密係数(7日) [cm^2/sec]	8×10^{-3}	12.2×10^{-3}
圧縮指数(7日)	1.27	1.1
透水係数(7日) [cm/sec]	3.3×10^{-8}	8.2×10^{-7}
一軸圧縮強さ(28日) [kN/m^2]	300~500	300~500
変形係数(28日) [kN/m^2]	60000~80000	20000~30000

(2) 泥水モルタル方式に関する実験

泥水モルタル方式は、安定液として自硬性の材料を用いるため、安定液としての諸条件と硬化後の強度特性や圧密・透水特性を同時に満足させる必要がある。また、自硬性のため掘削中に粘性が増加するなど施工上の課題が生ずるが、この点についても併せて検討する必要がある。

(a) 配合試験

泥水モルタルとして粉砕粘土液とセメントおよびフライアッシュの混合物を用いるが、配合決定に関し表2-12に示す27通りの組み合わせで、安定液としての諸試験および強度試験を行った。その結果、ブリージング量3%以下、初期ファンネル粘性25秒前後、さらに1週強度が $200 \sim 300 \text{ kN/m}^2$ 前後の表2-13に示すような2種類の配合A、Bを実用的なものとして選定した。

(b) 連続ミキシング試験

掘削中の時間経過による粘性上昇に関しては、表2-13の2種類の配合と、添加剤としてテルナイトBを加えた配合とについて、連続ミキシング試験を行った。図2-27はその試験結果を示しているが、添加剤を加えないものは、連続ミキシングによって2~4時間で粘性

表 2-12 泥水モルタル配合の組み合わせ

W/C+L+F	C/C+L+F	L/L+F	F/L+F
2.5	0.3	1.0	0
2.0	0.5	0.8	0.2
1.5	0.7	0.6	0.4

表 2-13 泥水モルタルの標準配合

W	C	L	F	ブリージング量(%)	ファンネル粘性(秒)	一週強度(kN/cm ²)
2.0	0.5	0.4	0.1	1.6	26	207
2.0	0.7	0.3	0	3.0	22	254

が急上昇することが知られた。一方、添加剤を 0.3% 加えた場合には、連続ミキシングによる粘性上昇は小さく 10 時間程度は施工上有用な粘性を保つことが結果として得られた。また、添加量 0.5% のケースについて、30 分毎のミキシングと放置とを繰り返す試験を行ったが、この場合でも有用な粘性が得られることが確認された。このようにセメントが配合された泥水でも、それが常に攪拌された状態では、硬化すなわち流動性低下の始発が遅れる現象（チキソトロピー現象）を示すもので、これは 2.1(1) でも述べたように粘土鉱物とセメントとの界面化学的な特性にもとづくものである。

また、図 2-28 は連続ミキシングが強度に与える影響を示したもので、添加剤を加えない場合は、攪拌開始後 1～3 時間のミキシング時間が短い段階では強度が初期値に比べて増加する傾向となるが、4 時間を過ぎる段階から強度が低下し、その割合はセメント量が少なく粘土分の多い配合 A がとくに大きい。一方、添加剤を加えた配合は、初期値を含め強度が無添加のものに比べ 6～7 割程度低下するが、連続ミキシングによる影響はほとんどなく 10 時間程度はほぼ一定の強度特性を示すことが知られた。図 2-29 は、テルナイト添加量 0.3% の配合についての養生期間と強度との関係を示したものである。これによると、28 日強度が約 200kN/m² となっており、無添加の配合に比べ 1/3 程度強度は小さくなるが、実用的には施工中の掘削土が混入し強度上昇も期待でき、遮水壁としての機能は十分果たすものと考えられる。

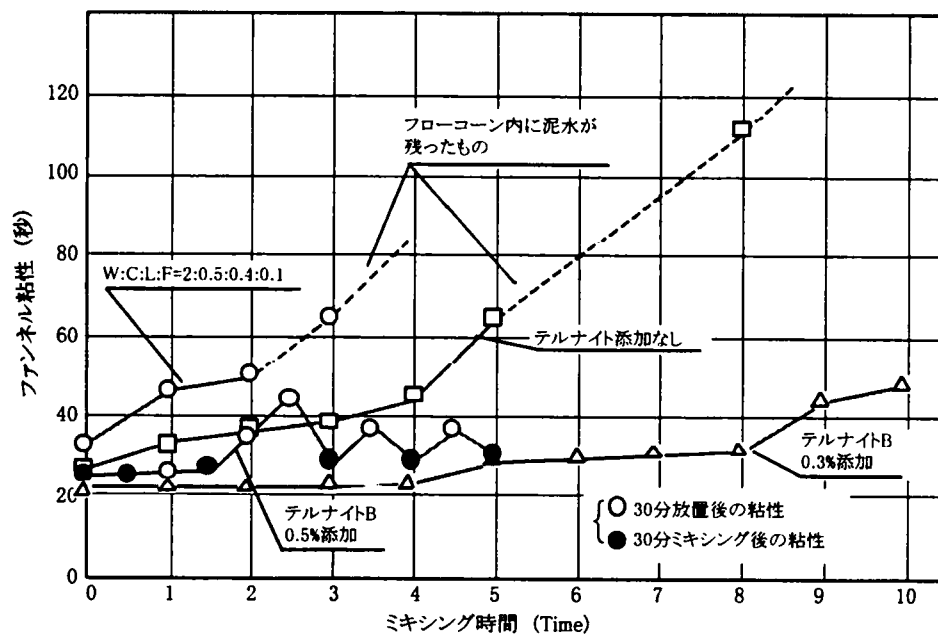


図 2-27 連続ミキシングに伴う粘性変化

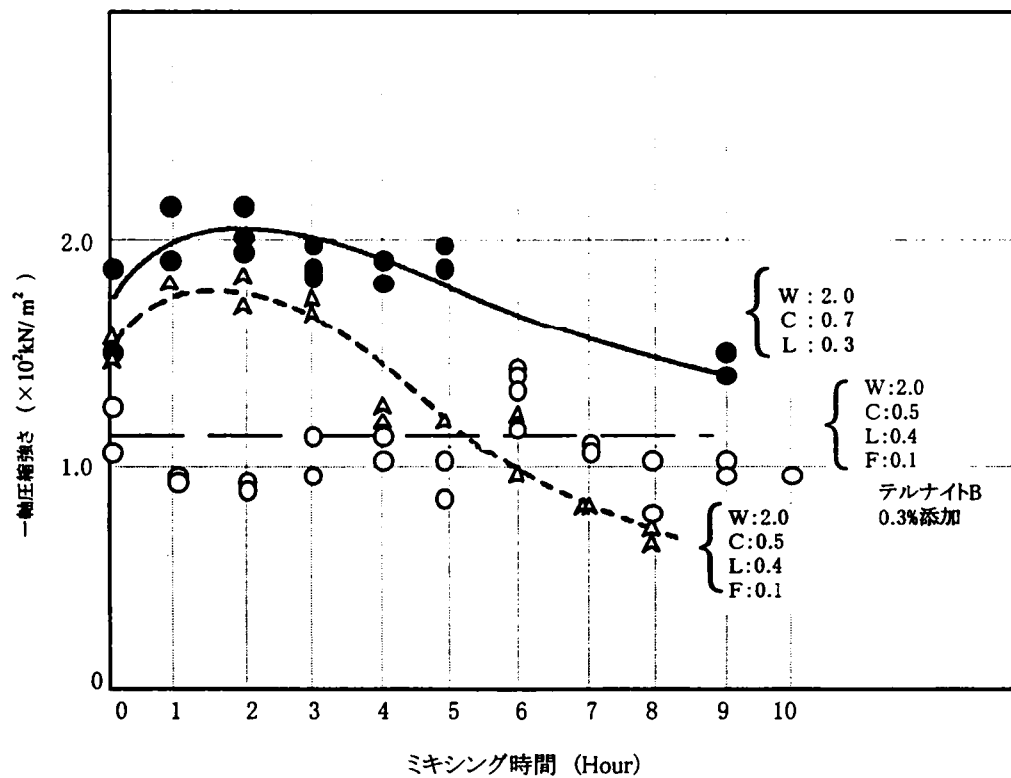


図2-28 連続ミキシングが強度に与える影響

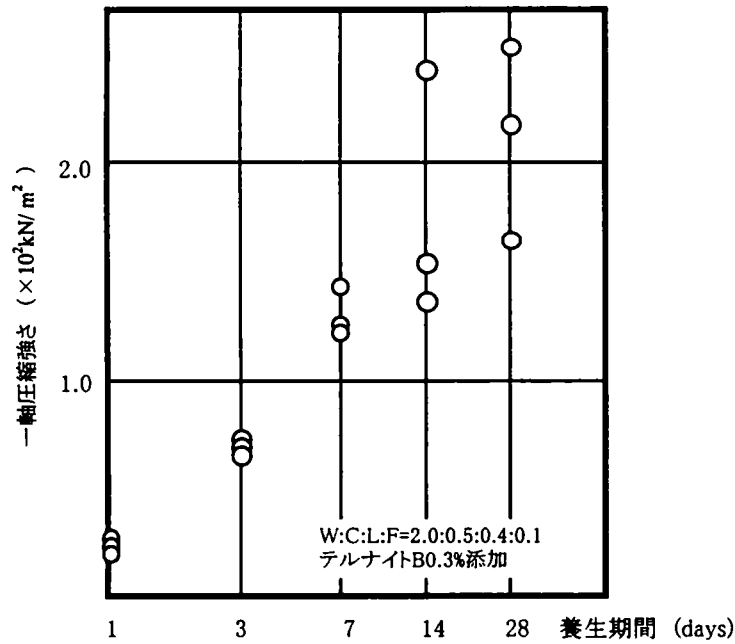


図 2-29 泥水モルタル強度と養生期間の関係

(3) 大型土槽による実験

以上のように泥水混合方式、泥水モルタル方式ともに粘土モルタル遮水壁の施工法として有効であることが示されたが、今ひとつの方式である置換方式については従来の方法に代わって粘土泥水を安定液として掘削し、本節(2)で述べた標準配合の粘土モルタルで置換するのみである。この場合粘土モルタルの比重は、1.40 程度とコンクリートに比べかなり小さいので、粘土泥水の比重が大きくなると置換が難しくなる恐れが生じる。したがって、置換方式の場合は図2-21にも示したように CMC を添加して、できるだけ比重の小さい泥水を使用することが望ましいと言える。

いずれにしても、これらの方式を現場実験で確認することが重要となるが、それに先立ち図2-30に示すような大型土槽を用いて滞水砂礫層地盤を再現、3つの方式による模型実験を行い、3方式ともその妥当性が確認された。

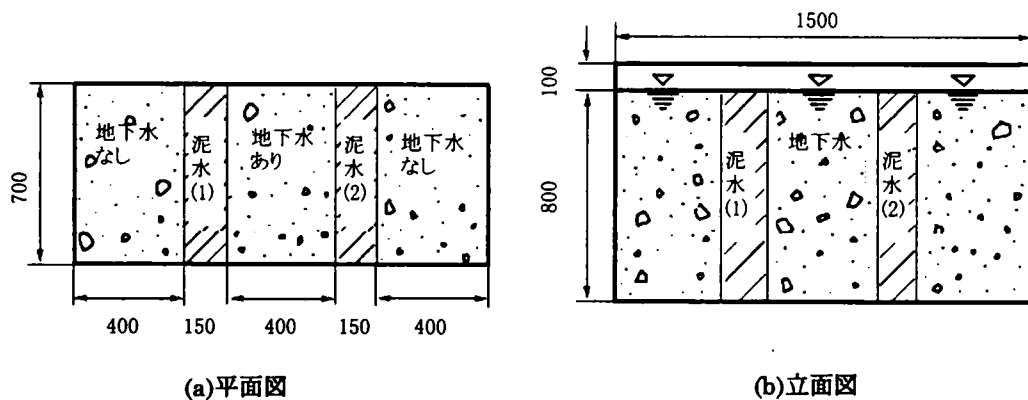


図 2-30 大型土槽実験 (単位: mm)

2. 4. 2 ケイソイル工法¹⁵⁾

本工法は、上述の泥水固化連続壁工法を発展的に展開したもので、遮水壁工法だけでなく、PC板による地中連続壁などにも広く応用する工法となっている。

(1) ケイソイル工法概要

(a) ケイソイル工法の特徴

本工法は、地中に掘削された溝や孔の壁面保護に用いられる掘削用泥水（安定液）や、スライム含有泥水などに、エアブロー攪拌を行いながら硬化剤を投入することによって、泥水をそのままの状態で所要強度の粘性土系物質（ケイソイル）に硬化させる工法で、次のような特徴をもっている。

- ① 地盤に掘削した溝や孔の中の泥水をそのままの形状で、かつ極めて短時間に硬化させることができる。したがって、溝や孔を早期に安定させることになる。
- ② 硬化したケイソイルは、ほとんど「粘土」と同じ形状を呈し、しかも高い止水性（ $k = 1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 以下）をもっている。
- ③ 硬化に使用する硬化剤は安価で、毒性などの心配は全くない。
- ④ 硬化に際し、騒音・振動は全くなく、工期の短縮とあいまって総合コストを大幅に低減させることができる。

(b) 掘削用泥水と硬化法

本工法に使用する掘削用泥水として、以下のような新泥水（ケイマッドウォーター）、硬化剤、および硬化法（エアブロー攪拌法）が同時に開発されている。

i) 新しい掘削用泥水（ケイマッドウォーター）

ケイソイル工法は、普通のベントナイト泥水（安定液）を完全に硬化させることができるが、さらに強度が必要な場合のためにそれに適した泥水を開発した。図2-31にベントナイトとの比較で、強度発現の違いを示しているが、ほぼ2倍の強度が得られている。

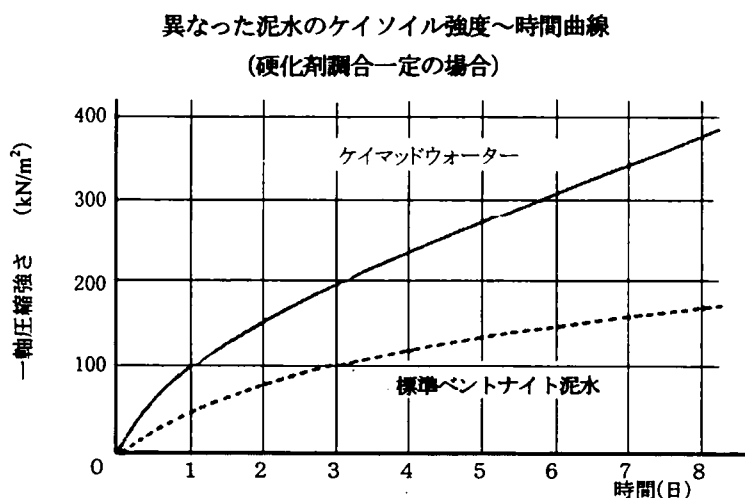


図 2 - 3 1 ケイソイルの強度変化

ii) 硬化剤

硬化剤は、A 剤（ケイ酸塩系無機物）と B 剤（セメントペースト＋調整剤）および数種の添加剤よりなり、A 剤と B 剤の調合割合によりケイソイルの強度を調整することができる。

iii) 硬化法（エアブロー攪拌）

硬化法はエアブロー攪拌によるが、これは図2-32に示すようにコンプレッサーによる圧搾空気を溝孔底部から噴出させ、泥水に対流・乱流をおこして攪拌・混合するものである。硬化反応は全体に均一に進むが、特にこの方法の優れている点は、圧搾空気は反応の遅れた粘性の低い部分を選択して流れ、なお一層均質な硬化を促進させることである。また、ケイソイル中に PC 板や H 鋼などの構造材を埋設する場合は、これらを所定の精度でセットした後任意に攪拌をおこなうことができ、掘削可能時間等の制約は一切受けない。

(2) ケイソイル工法の適用分野

(a) 地中止水壁工法

本工法は、地中に計画的に止水壁を設けるもので、確実な止水壁の構築が可能である。図2-33に施工手順を示すが、まず、止水壁予定位置に掘削用泥水を満たしながらトレンチを掘削する。次に不透水層など所定深度までの掘削が完了した後エア管を建て込み、エアブローをおこないながら硬化剤 A、B を投入する。エアブローは泥水がゲル化するまで行い、ゲル状になると同時にエア管を引き抜く。ゲルタイムは 3 分～15 分程度である。以上の作業により、24 時間後には一軸圧縮強度 $qu \approx 100\text{kN/m}^2$ のケイソイル止水壁が完成する。強度は時間の経過と共に増大し、3 日後には約 200kN/m^2 、7 日後には約 350kN/m^2 に達するが、それ以後の伸びは衰える。完成した止水壁は前述したように、透水係数 $k = 1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 以下の均一な止水性能を有する。

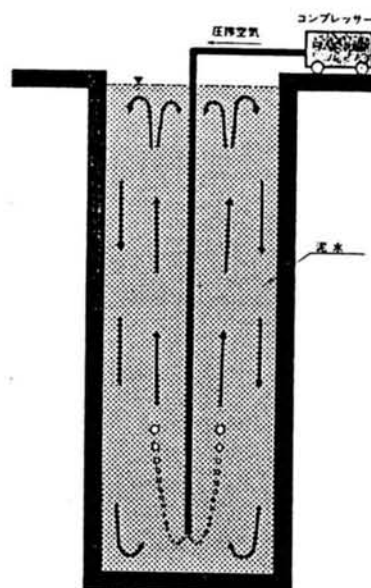


図2-32 エアブロー攪拌

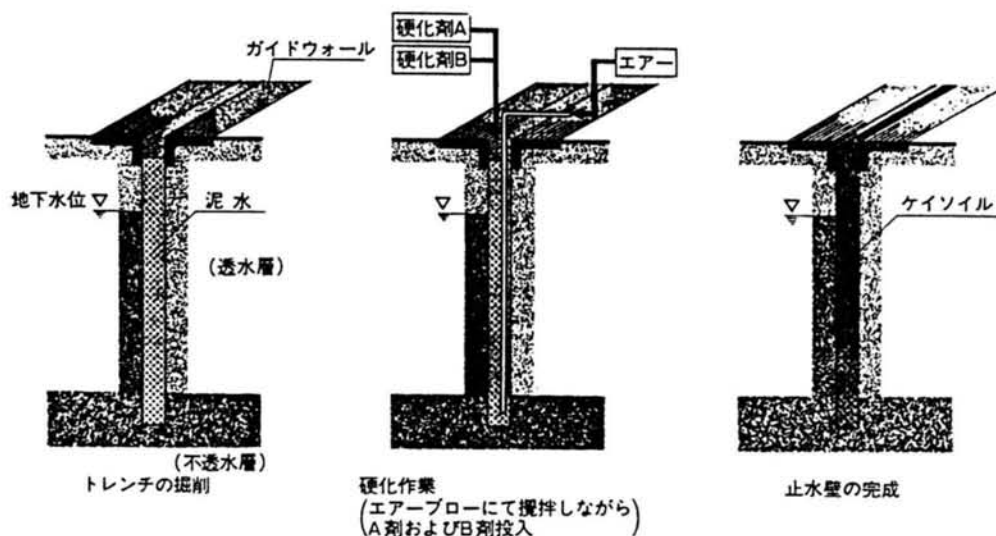


図 2-33 ケイソイル止水壁の築造法

(b) その他の応用工法

ケイソイル工法は応用範囲が広く、K-X シリーズとして他の工法への応用を図っている。地中連続壁にPC板を使用する工法 (K-W 工法)、モルタル柱列杭の杭間の止水に使用する工法 (K-P 工法)、騒音・振動が規制されている地域での親杭山止め工法 (K-J 工法)、同じくシートパイル山止め工法 (K-S 工法)、さらに、廃泥水処理をおこなう工法 (K-D 工法)などで、前述の地中止水壁工法は K-C 工法と称している。以下、それらの概要について触れておきたい。

i) ケイソイル～地中連続PC壁山止め工法 (K-W 工法)

従来の地中連続壁工法は、泥水中にコンクリートを打設することによる品質不安、壁間継手部の止水不完全、劣化泥水の処理などの難点があったが、本工法は、PC板を使用すること、掘削に使用した泥水はすべて硬化させてしまうこと、壁間継手部の裏側もケイソイルによる完全な止水層となることなどの特徴をもっているため、従来工法の難点を一挙に解決し、工期も約2/3に短縮する画期的な工法である。

ii) ケイソイル～パイル山止め工法 (K-P 工法)

従来のモルタル柱列山止め工法は、杭間の止水を薬注などによりおこなっていたが、こうした方法では、注入不完全などによる漏水、薬液による周辺地下水汚染などの難点があった。本工法は、ケイソイル杭とモルタル杭をラップさせながら交互に打設するため、杭間の止水が完全に可能であり、しかも周辺地盤や地下水への汚染が全くない。施工手順を図2-34に示す。

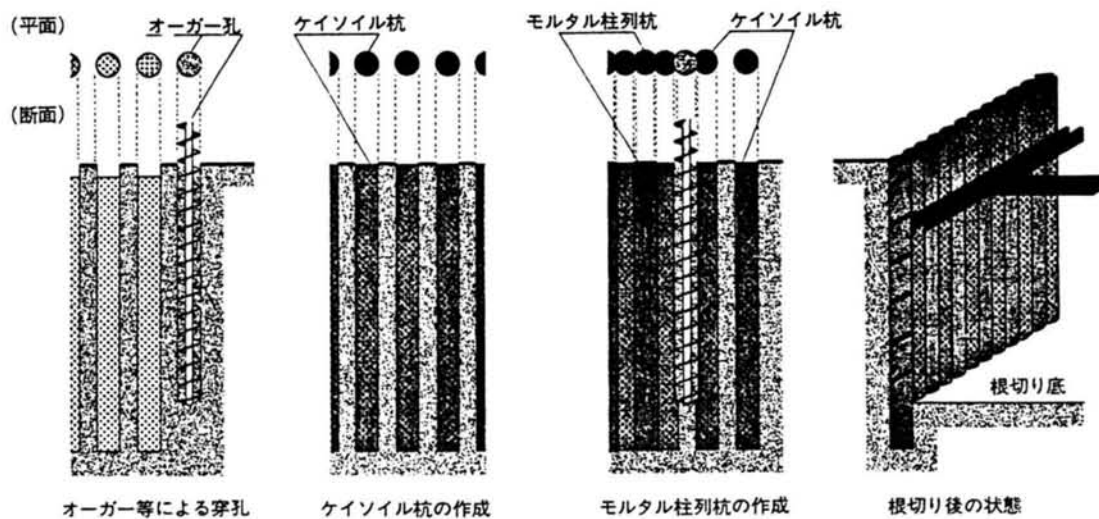


図 2-34 パイル山止め工法 (K-P 工法)

iii) ケイソイルー親杭山止め工法 (K-J 工法)

従来の親杭山止工法 (ジョイスト工法) では、H 形鋼などを打設し、堀削時に横矢板を挿入して山留めをおこなっていたが、最近では打設による騒音・振動のため親杭の打設が規制されることが多く、こうした場合には、アースオーガーなどによる削孔後、親杭を建て込み、間隙を砂またはセメントミルクで充填する方法をとらざるを得なくなっている。ところが、この方法では、充填不完全 (砂の場合) や親杭の引き抜き回収が不可能 (セメントミルクの場合) などの難点があった。本工法は、オーガーなどによる削孔後、親杭を建て込み、孔内の泥水を硬化させるため、無振動、無騒音で施工でき、間隙の充填も完全であり、親杭の引き抜き回収も可能である。

iv) ケイソイルーシートパイル山止め工法 (K-S 工法)

K-S 工法と同様、シートパイル山止め工法への応用で、トレンチを掘削後シートパイルを建て込み、トレンチ内の泥水を硬化させるものである。溝内の泥水を硬化させるため、シートパイルの継手部の止水も完全である。

v) ケイソイルー廃泥水処理工法 (K-D 工法)

従来、ヘドロや高含水比の泥水は、凝集剤によって固形分と水とを分離し、さらに水は pH 調整をおこなうという複雑な方法でおこなっていたが、本工法では泥水に硬化剤を投入し攪拌するというだけの簡単な作業により約 6 時間後にはトラックで運搬可能な程度にまで硬化させることができる。また、一度に大量の泥水処理が可能で、硬化物は無公害な土として搬出できる。なお、本工法のみ特殊ミキサーで攪拌をおこなう。施工手順を図 2-35 に示す。

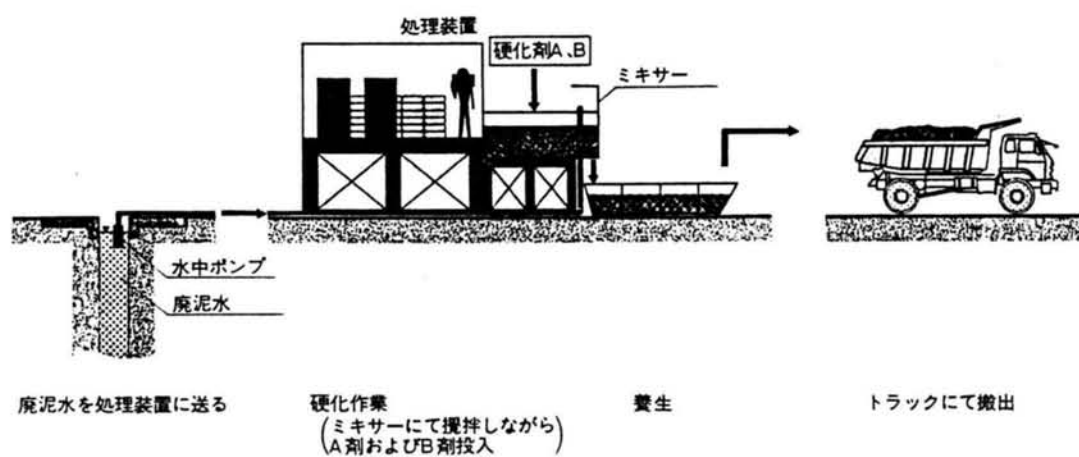


図 2 - 3 5 廃泥水処理工法 (K-D工法)

2. 5 ReSM工法による埋戻し・充填工法の研究開発

2. 5. 1 概要

第1章1. 3. 1(2)でも述べたように、シールド工事から発生する軟弱な粘性土などは、産業廃棄物の「汚泥」に該当すると判断されることが多いが、その判断の基準があいまいであるため客観性に欠け、処分段階で産業廃棄物と見なされるケースが多く、当初予算外というかたちで処理費が非常に高くつくことになる。また、そのような土質性状の土を安易に盛土材として用いると、地盤沈下の恐れや降雨による盛土の再流動化を生じ易い。これまでの傾向として、シールド廃泥は約70%が自由処分され、さらにその半数が何等かの方法で固化処理をされている。その方法としては、発生場所や利用場所あるいは中間処理ヤードにおいて、セメント系、石灰系などの土質改良材で混合し、化学的に性状を改善することによって運搬性の改善や有効利用のための要求品質を確保することが、一般的である。

これに対し最近では第1章でも紹介したように、シールド廃泥以外の「低品質な発生土」、すなわち、これまでは産業廃棄物として扱われていたような泥土や浚渫土も含めて、流動化処理土やソイルモルタルとして埋戻しや盛土、空洞充填などに積極的に有効利用することが具体化してきている。

これらの動きに対応して、それらの流動性（フロー値）や分離性状（ブリージング）といった物理的特性および強度、透水特性といった力学的特性について、これまで多くの研究が行われてきた。また、セメントなどの安定剤を混合した土の圧縮特性に着目した研究も行われるようになってきており、その結果として、セメント安定処理土はいわゆる過圧密粘土のような特性を示し、圧密降伏応力が存在することが知られている。例えば藤原は¹⁶⁾、カオリン粘土にセメントを混合させ、一軸圧縮試験および定ひずみ速度圧密試験を行い、材令やセメント添加量と強度特性および圧縮特性の関係について調べた結果、含水比、セメント添加量および材令の増加にともない一軸圧縮強さと圧密降伏応力が増加し、一軸圧縮強さ q_u と圧密降伏応力 P_c の間に相関性が見られること、また、一軸圧縮試験における変形係数 E_{50} と $c_u (=q_u / 2)$ の間にも相関性があることなどを報告している。また、坂上らは¹⁷⁾、ソイルモルタルの標準圧密試験を行い、養生期間が長くなると圧密降伏応力および圧縮指数が大きくなる傾向にあること、またセメント添加量が多い方がその傾向が強いことを報告している。

これまでも述べてきたように、本論文の研究対象である粘土モルタルやReSMソイルモルタルは、セメントを硬化剤に使用することのほか、発生土に含まれる粘土鉱物の界面化学特性を生かし、他の流動化処理土に比べても含水量が多く（空隙率が高い）という特徴があるモルタル～泥水状態の材料である。写真2-2に泥水状態の配合条件でのソイルモルタル処理土の電子顕微鏡写真を示すが、土質材料に比べて空隙が大きいことがわかる。

本節では、このような空隙の大きい構造が、ソイルモルタルの力学特性、とくに埋戻しや盛土に関係の深い圧縮変形特性にどのような影響を与えるのか、シールド工事に伴う建設発生土を用いて行った実験結果を中心にまとめることとした。



写真 2-2 ソイルモルタルの電子顕微鏡写真 (10000 倍)

2. 5. 2 ソイルモルタルの強度特性

(1) 実験に用いたシールド発生土の分類と物理的性質

実験に使用した発生土は、土圧式シールド工事から排出されたシールド残土で、その物理特性を表2-14に、また、粒度分析結果を図2-37に示す。この図をもとに三角座標を用いた粒径による土の分類を行うと、砂分 5%、シルト分 57%、粘土分 38%であることからシルト質粘土に分類される。

表 2-14 シールド排泥の物理的特性

自然含水比 W(%)	液性限界 LL(%)	塑性限界 PL(%)	塑性指数 IP	液性指数 IL	比重 Gt	湿潤密度 γ_t (g/cm ³)
83.0	79.7	30.5	49.2	1.07	2.647	1.485

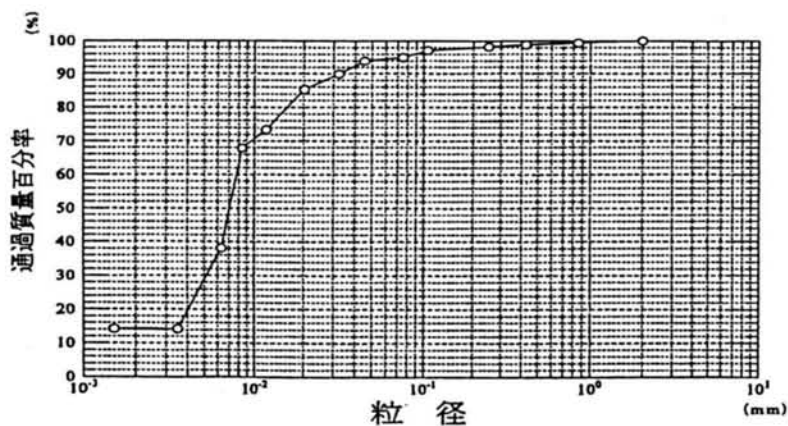


図 2-36 シールド排泥の粒径加積曲線

(2) 実験概要

(a) 配合条件

試験で使用したシールド廃泥は、2mm フルイにより粒径 2mm 以上の粒子や貝殻などを除去した後、十分に攪拌して均質にしたものである。その 2mm フルイ通過試料の含水比は約 83% であったが、試料により含水比のばらつきがあったため、練り混ぜ時に含水比を 90% に調整して使用した。

ソイルモルタルは、水中投棄（水中埋立て）、埋戻し、盛土さらには空隙充填材料などとして再利用できるように、その目標一軸圧縮強度を 28 日養生で、 $q_{u28}=200\sim700 \text{ kN/m}^2$ 程度とした。配合割合の標準値としては、混合処理土 1m^3 あたり、シールド廃泥を 0.5m^3 、セメントの混合割合を 100kg, 200kg, 300kg として、排泥量、セメント量および水量を決めた。

この配合に際しては、シールド廃泥の処理にあたり、コンクリートポンプによる圧送の能率向上を考慮して、プレパクトフロー値が 15～20 秒になるよう使用水量を設定している。これは従来のソイルモルタルより流動性が高くなるように設定したものである。標準配合では、混合処理土 1m^3 あたりシールド廃泥を 0.5m^3 、セメント混合割合を 100kg, 200kg および 300kg としたが、実際の配合ではプレパクトフロー値の調整のため水を追加したので、表 2-15 の配合条件表にも示すように、シールド廃泥の体積ならびにセメント混合量が目標値より小さくなっている。

なお、配合設計では、

シールド廃泥の湿潤密度 $\gamma_t = 1.485 \text{ g/cm}^3$ セメントの密度 $\gamma_c = 3.14 \text{ g/cm}^3$

シールド廃泥の含水比 $W = 90.83 \%$

としている。

表 2-15 セメント混合処理土の配合条件

	試料名		A100	A200	A300
密度	シールド廃泥 γ_t	g/cm^3	1.485		
	セメント γ_c		3.14		
	水 γ_w		1.00		
重量	シールド廃泥 W_t	g	723.8	648.7	612.1
	セメント W_c		91.6	157.0	236.8
	水 W_w		483.6	516.7	512.6
	試料全体 W		1299.0	1313.4	1361.5
体積	シールド廃泥 V_t	cm^3	0.487	0.438	0.412
	セメント V_c		0.029	0.050	0.075
	水 V_w		0.484	0.517	0.513
	試料全体 V		1.000		
試料密度 γ		g/cm^3	1.299	1.313	1.361

(b) 供試体作製と試験方法

i) 混練

規定量の水を入れ練り混ぜ機を始動させ、パドルを回転させながら 30 秒後に規定量のセメントを投入、さらにその 30 秒後に 4 分法により粒径 2mm アンダー、含水比 90%に調整した規定量のシールド廃泥土を混入し、引続いて 60 秒間練り混ぜした後 20 秒間休止する。この休止の間にさじで練りはちおよびパドルに付着したシールド排泥をかき落とし、さらに練りはちの底の廃泥をかき上げるように、2～3 回かき混ぜる。その後練り混ぜ機を再び始動させ 8 分間混練後、練りはちを練り混ぜ機から取り外し、さじで 10 回かき混ぜ出来上がったものに対しプレバクト・フローコーン試験を行い、フロー値が 15～20 秒になるように水を添加、調整して、これを試料とした。

ii) 供試体

一軸圧縮強度試験に用いる供試体は、直径 5cm、高さ 10cm のモールドを使用して作成した。その手順は以下の通りである。

- ① 試料を 3 層に分けモールド（上部をガムテープでかさ上げしている）に詰め、各層を突き棒で 25 回均等に突く。
- ② 2 層目以後は前層を突かないように注意するとともに、各層を突き終わった後、型枠側面を軽くたたいて、突き棒によってできた穴がなくなるようにする。
- ③ 最上部はガムテープ部分まで詰め、軟練による試料の沈みやブリージングに対応させる。
- ④ 打ち込み後 24 時間以降 48 時間以内に脱型、湿度 95%、温度 20 度の恒温恒湿器で養生する。
- ⑤ なお、脱型にあたっては、まずモールド上部に巻いたガムテープを取り除き、盛り上がっている部分をモールドの上面に沿って丁寧にナイフ等で削り取る方法を採用した。

以上により作成した供試体の材令は、3 日、7 日、14 日、28 日および 90 日とし、一軸圧縮強度試験の直前に恒温恒湿器から取り出し、試験に供した。

(3) 実験結果

(a) 一軸圧縮特性

上記のようにして作成した、シールド廃泥にセメントを添加したソイルモルタル供試体の一軸圧縮試験結果を、表2-16および図2-37, 38に示す。

表 2-16 ソイルモルタルの一軸圧縮試験結果

試料材令	3 日	7 日	14 日	28 日	90 日	90/28
A100	1.940	2.548	2.740	3.248	4.848	1.49
A200	2.069	3.678	5.037	5.959	7.959	1.34
A300	4.487	6.922	11.324	12.809	17.669	1.38

(単位: kN/m^2)

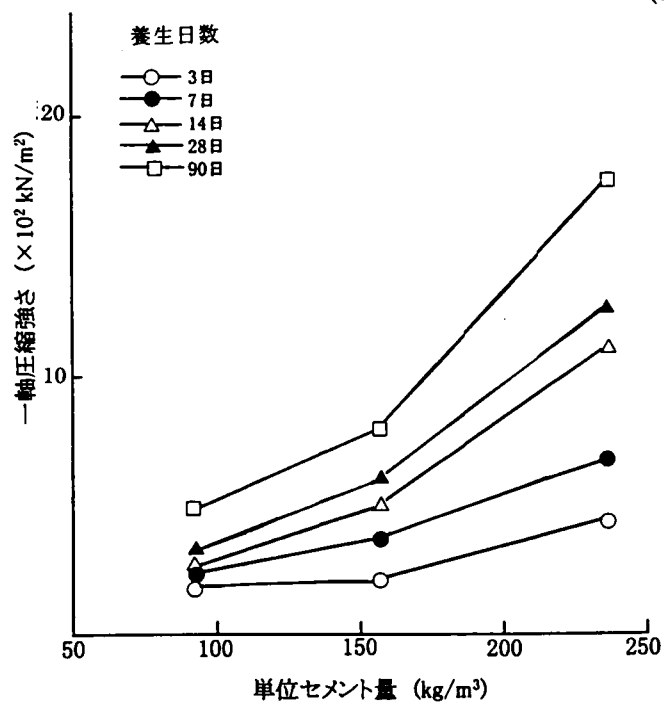


図 2-37 ソイルモルタルのセメント量と一軸圧縮強度の関係

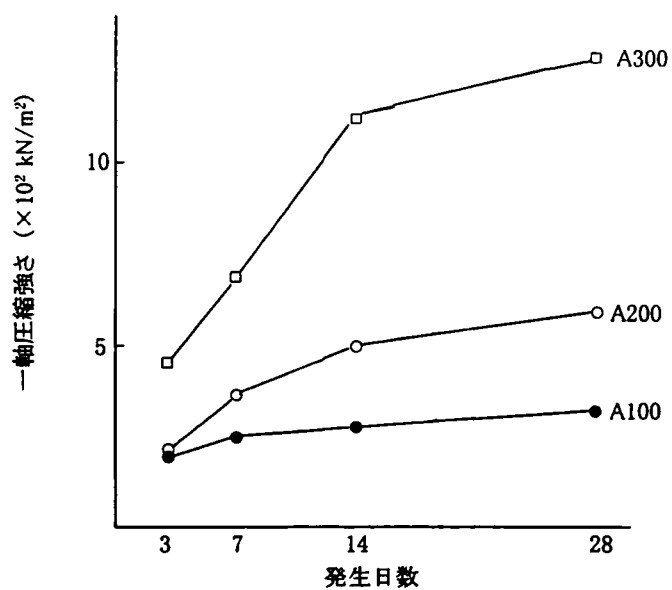


図 2-38 ソイルモルタルの養生期間と一軸圧縮強度の関係

これらによると、図2-37に示すようにセメント混合量が大きくなると強度は増加するが、養生期間をある程度経たのちその効果が発揮される傾向にある。このことは図2-38において、セメント混合量が大きいほど養生期間に対する強度増加の割合が大きい、ということに対応する。

(ロ) 一軸圧縮強さと表面貫入強度、CBR およびコーン指数との関係

ソイルモルタルの強度は、通常は一軸圧縮強さで評価するが、用途や適用箇所によっては他の強度定数で評価する必要がある場合がある。とくにソイルモルタル埋戻し後現位置における強度確認は重要で、その評価の指標として山中式土壌硬度計による表面貫入強度、CBR、ポータブルコーン指数 p_c などがある。これらについては、既存の室内試験や試験施工でのデータをもとに、一軸圧縮強さ（28 日）とそれぞれの指数との関係が求められており、例えば路面下の空洞充填や道路下での埋設管などの埋戻しに用いられる CBR について、図2-39に示すような関係が知られている。

この結果からも見られるように、ソイルモルタルの一軸圧縮強度と現位置強度指標との間には整合性ある相関があるが、現場ごとに品質管理目的に応じたキャリブレーションが求められることになる。

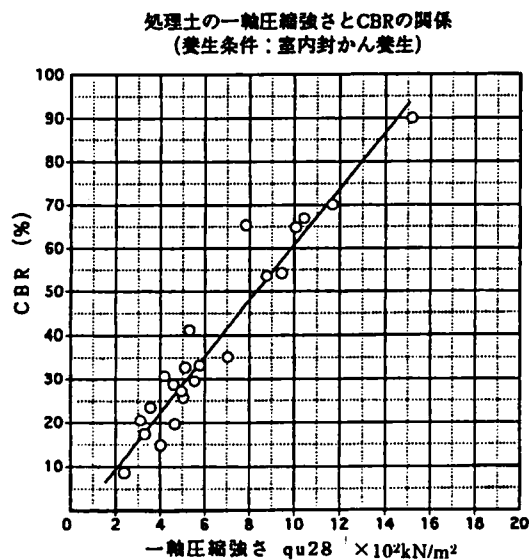


図2-39 一軸圧縮強さとCBRとの関係¹⁸⁾

2. 5. 3 ソイルモルタルの圧縮特性

ソイルモルタルは、流動性を高めるために他の処理工法に比べて土量比率が小さく、初期含水比(あるいは初期間隙比)が非常に大きい。このように間隙比ならびに含水比の大きい処理地盤では、強度だけでなく圧密特性も重要な問題となると考えられるが、これまでソイルモルタルの圧密特性に関する報告はあまり多くない。

そこで本研究では、高含水比のソイルモルタルの圧密特性を調べるために、定ひずみ速度圧密試験を実施した。

(1) 実験概要

(a) 配合条件と供試体

実験で使用したソイルモルタルの配合条件は、一軸圧縮試験で用いたものと同じとした。また、比較のためにセメントを混合しない廃泥試料の圧密試験も実施した。この廃泥試料は液性限界の約 1.2 倍の含水比で練り返し、 $\phi 20 \times h 20 \text{cm}$ の容器の中で約 50 kN/m^2 の圧力で再圧密したものである。

(b) 試験方法¹⁹⁾

通常の圧密試験では、段階载荷方式で各段階 24 時間载荷とする方法が用いられている。しかしながら、この段階载荷方式では一連の試験に長い期間を要するため、ソイルモルタルのように時間の経過とともに硬化が進むような材料の特性を調べるには不適である。そこで、本試験では、短時間で試験が可能な定ひずみ速度圧密試験を採用した。

定ひずみ速度圧密試験は、供試体を一定の速度で圧縮しながら、供試体に作用する圧縮応力と供試体内に発生する過剰間隙水压を測定することにより、供試体内部の有効応力変化と圧縮量の関係を求めるものである。今回使用した試験機は、マルイ製作所製の 3 連式定ひずみ速度圧密試験機(MIS-232-1-55 型)である。

この定ひずみ圧密試験の長所は、

- ① 試験時間が短縮できる
- ② 超軟弱粘土から硬性粘土まで、また有機質から砂質粘土まで適用範囲がきわめて広い
- ③ 試験の自動化が簡単
- ④ 連続的なデータが得られ、また载荷に衝撃を伴わない

ことであり、ソイルモルタルの圧密特性を調べるのに適しているといえよう。

圧密試験は、定ひずみ速度圧密試験に関する土質工学会基準(JSF T 412-1992)に準拠して行い、ひずみ速度は $0.05\%/\text{min}$ とした。圧密試料の大きさは、直径 60mm (断面積では 28.27cm^2)、厚さ 20mm である。

定ひずみ速度圧密試験においても、試験にはおよそ 1,000 分(約 17 時間)の時間を要する。したがって、定ひずみ速度圧密試験は、試料の硬化反応が落ち着くと思われる 28 日養生試料に対して行った。

(2) 実験結果

圧密試験は、所定の配合条件でセメントを混合した試料(試料名:A100、A200、A300)および排泥試料のそれぞれについて3本ずつ、合計12本の試料を用いて行った。

表2-17に実験結果一覧を示す。

表2-17 ソイルモルタルの圧縮特性

項目・試料名	A100	A200	A300	廃 泥
初期密度 (g/cm ³)	1.317	1.338	1.366	1.542
初期間隙比	4.634	4.038	3.567	1.627
初期含水比 (%)	157.5	139.6	117.5	59.9
圧縮指数	2.57	2.33	2.16	0.20
圧密降伏応力(kN/m ²)	4.5	8.2	13.0	—

なお、ソイルモルタルの間隙比は試料高さ H に対し、次式によって求めている。

$$e = H / H_s - 1 \quad (3.1)$$

ここに、 H_s は土粒子とセメントからなる実質部分(骨格部分)の体積を試料高さに換算したもので、次式で与えられる。

$$H_s = W_d / (\gamma_{cs} \times A) \quad (3.2)$$

W_d は圧密試料の乾燥重量、 A は試料の断面積(28.274cm²)、 γ_{cs} は土粒子とセメントからなる実質部分の密度で、

$$\gamma_{cs} = (W_s + W_c) / (V_s + V_c) = (W_s + W_c) / (W_s / \gamma_s + W_c / \gamma_c) \quad (3.3)$$

で計算される。

ここに、 W_s 、 W_c 、 V_s 、 V_c 、 γ_s 、 γ_c はそれぞれ土粒子とセメントの重量、体積、密度である。

(3) ソイルモルタルの圧縮特性

(a) 圧密降伏応力と圧縮指数

図2-40は、圧密圧力(圧密有効応力)と間隙比の関係を示したもので、それぞれ3本ずつの試験結果の平均値をとったものである。この図より、ソイルモルタルの圧縮曲線はいわゆる過圧密土の圧縮曲線に非常によく似ていることがわかる。

これは、セメントと水の化学反応により粒子間に、エトリンガイト ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) が形成され、土の構造骨格が強化されたためである。セメント混合土は、板状の粘土粒子間に棒状のエトリンガイトが形成され、粒子同士を強く結びつけていること

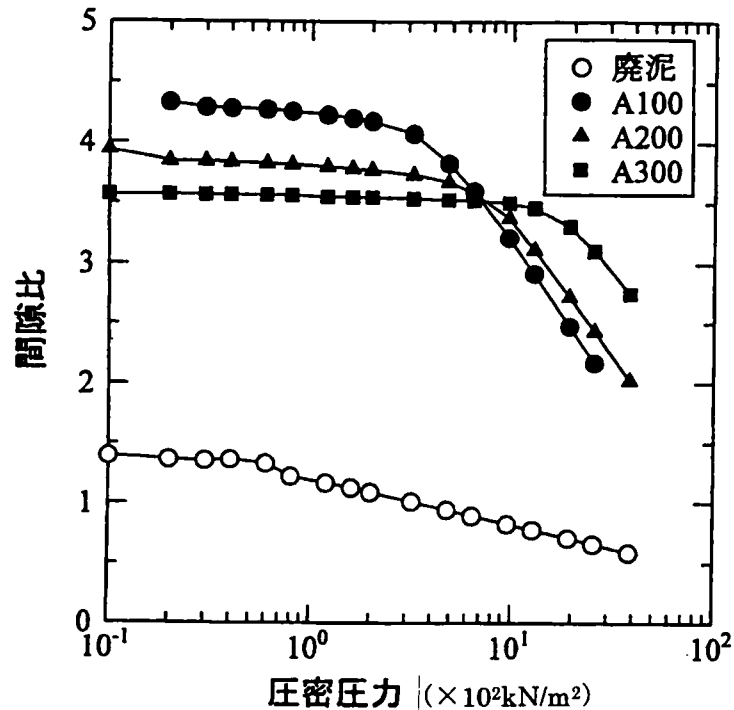


図2-40 ソイルモルタルの圧縮曲線

による構造骨格の強化に伴いある圧縮応力まではソイルモルタルの圧縮性は小さいが、それを越えると構造骨格が破壊されて非常に大きな圧縮性を示すことになる。したがって、セメント混合土の圧縮曲線の変曲点に対応する圧密降伏応力は、セメントによる粒子構造の固結作用の程度を表すものと考えられる。

図2-41は、セメント混合量と圧密降伏応力の関係を示したもので、セメント混合量が増加するにつれて、圧密降伏応力も大きくなるのがわかる。また、セメント混合量が 200 kg/m^3 から 300 kg/m^3 に増加する間で、圧密降伏応力の増加割合が大きくなっている。同様の結果は、前述の藤原ら(1996)によっても報告されている¹⁶⁾。

以上述べたように、ソイルモルタルは圧密降伏応力を越えると非常に大きな圧縮を生じる。図2-42は、セメント混合量と圧縮指数 C_c の関係を示したものである。この図より、セメント混合量が増えるにつれて、圧縮指数は減少する傾向がみられるが、セメントを混合しないシルド廃泥の圧縮指数の 10 倍以上も大きい。すなわち、ソイルモルタルは、セメントの固結作用により、間隙比が大きい状態においても安定した構造骨格を有するが、いったんこの構造骨格が破壊されると、大きい圧縮を示すことになる。したがって、高含水比の土を対象とする場合には、改良地盤に圧密降伏応力を越える圧力が作用すると非常に大きな圧縮変形が生じるため、改良地盤の圧密降伏応力の評価が重要な問題となる。

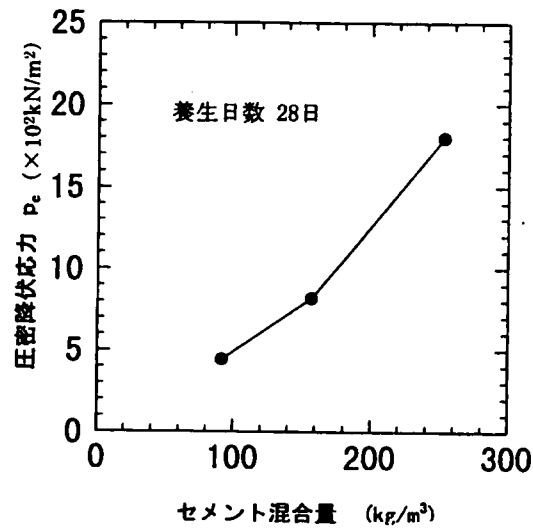


図 2-4 1 ソイルモルタルの圧密降伏応力

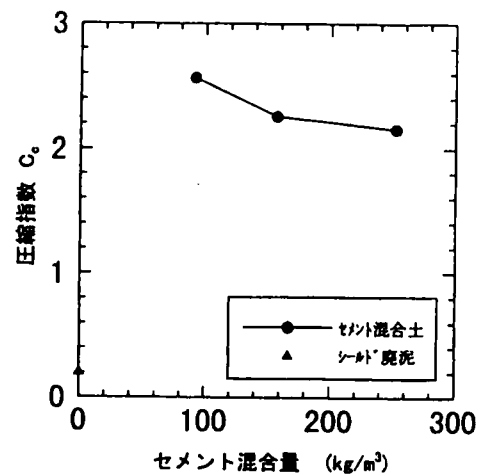


図 2-4 2 ソイルモルタルの圧縮指数

(b) 自然堆積粘土との比較

自然堆積粘土においても、洪積粘土のように堆積後長い年月を経た粘土では、種々の物理化学的作用により粒子間の結合力が強まり、ソイルモルタルと同じような圧縮特性を示すことが知られている。自然粘土における粒子間の結合力はセメンテーションと呼ばれ、また、時間の経過にともなう構造骨格の硬化は年代効果(Aging)と呼ばれている。以下においては、ソイルモルタルとセメンテーションを有する自然堆積粘土の圧縮特性の比較を行ってみることにする。

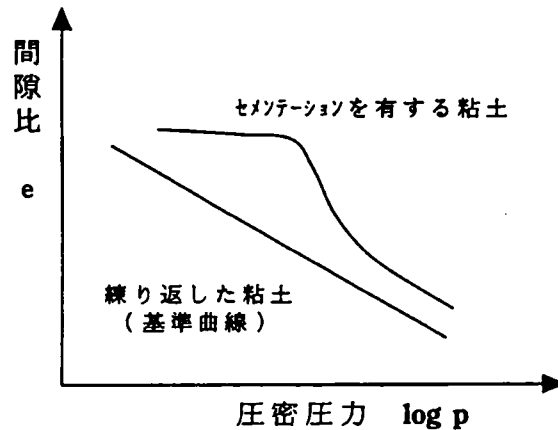


図2-43 セメンテーションを有する粘土の圧縮曲線

図2-43は、セメンテーションを有する粘土の圧縮特性を模式的に示したものである。この図に示すように、セメンテーションを有する粘土は、その構造骨格の固結力に対応した圧密降伏応力を有するが、いったんその構造が破壊されセメンテーションが消失すると大きな圧縮性を示す。

近年このような自然堆積粘土におけるセメンテーションの評価が種々の方法によって行われているが、その一つの方法として、図2-43に示したように、練り返してセメンテーションを消失させた粘土の圧縮特性を基準として評価する方法がある。基準となる練り返し粘土の圧縮曲線もいくつか提案されており、その一つとして、柴田・西原(1997)は圧密圧力 p との関係で次式を提案している。²⁰⁾

$$\psi = 1.4 - 0.8 \log p \quad (3.4)$$

ここで ψ は次式で表されるような間隙比と土の液性限界 W_L の関数である。

$$\psi = (e - 0.35) / (W_L - 0.1) \quad (3.5)$$

ただし、上式における液性限界 W_L は%ではなく比で表した値である。また、 p の単位は kN/m^2 である。

図2-44は、ソイルモルタルならびに廃泥試料の ψ と圧密応力の関係を示したものである。この図より、セメントを添加しない廃土試料の圧縮曲線は式(3.4)で与えられる基準曲線にほぼ一致しており、今回用いた試料に対しても同式を基準曲線の式として適用できることがわかる。

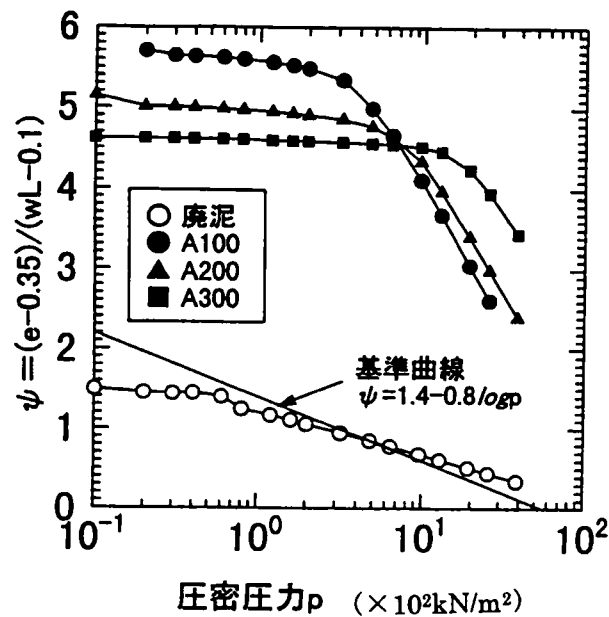


図 2-44 ψ と圧密応力の関係²¹⁾

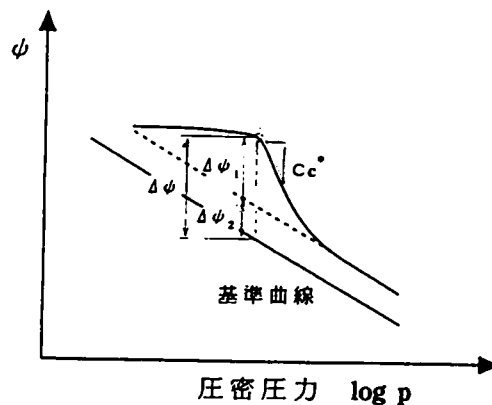


図 2-45 セメンテーションを評価するためのパラメーター²¹⁾

ここで、 $\Delta\psi$ は、図2-45に示すように、洪積粘土の圧縮曲線が基準曲線に平行となる領域における両圧縮曲線の ψ の差であるとして、柴田・松井(1994)²¹⁾は、図2-43に示したように大阪湾岸の洪積粘土の圧縮曲線は圧密降伏後非常に大きな圧縮性を示すが、圧縮応力が大きくなるにつれて間隙比は次第に小さくなり、最終的に基準曲線に平行となる傾向が見られるとしている。このことより、洪積粘土におけるセメンテーションの程度を評価する指標として、洪積粘土の圧密降伏応力における間隙比と基準曲線の間隙比との差 $\Delta\psi$ と、圧密降伏応力を越えた直後の洪積粘土の圧縮指数 Cc^* の関係に注目し、図2-46(1)の関係を報告している。

この図2-46(1)の結果により、洪積粘土の $\Delta\psi$ と Cc^* の間には、以下のような関係が成り立つとしている。

$$Cc^* = 0.28 + 4.4(\Delta\psi - \Delta\psi_2) \quad (3.6)$$

これに対し図2-46(2)は、以上のような結果に基づきセメント混合土の $\Delta\psi$ と Cc^* の関係をプロットしたもので、 $\Delta\psi$ は洪積粘土の場合に比べて非常に大きい。また、同図には、式(3.6)において、 $\Delta\psi_2=1,2,3$ としたときの $\Delta\psi$ と Cc^* の関係を示しているが、ソイルモルタルにおいても洪積粘土と同様の関係が成り立つとすれば、 $\Delta\psi_2=2\sim 2.5$ 程度の値となる。すなわち、ソイルモルタルの $\psi\sim\log p$ 関係は最終的に、基準曲線と $\Delta\psi_2=2\sim 2.5$ だけ離れた平行な直線に漸近することになる。

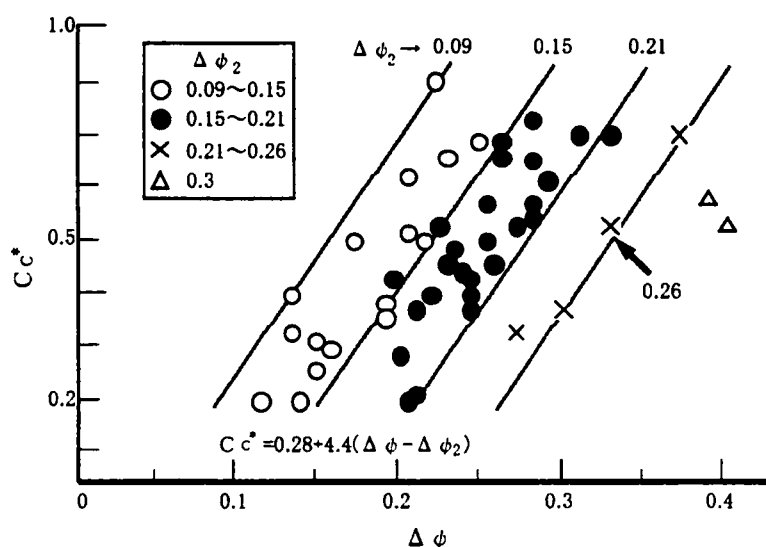


図2-46 (1) Cc^* と $\Delta\psi$ の関係(柴田/松井による²¹⁾)

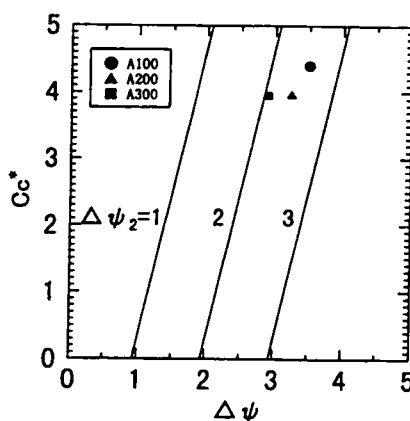


図2-46 (2) Cc^* と $\Delta\psi$ の関係(今回の実験による)

以上のような観点から、今回の実験に供したソイルモルタルについて図2-44に示した $\psi\sim\log p$ 関係図に、 $\Delta\psi_2=2$ および 2.5 だけ平行移動された基準線を点線で添記したものが、図2-47である。残念ながら、今回の試験では $p=3000\text{kN/cm}^2$ までしか载荷することができなかったため、はっきりしたことはいえないが、図2-47を見るかぎり、セメント混合土の $\psi\sim\log p$ 関係が基準曲線に平行な直線に漸近する傾向は見られない。このことが

ら、ソイルモルタルとセメンテーションを有する自然粘土の圧縮特性は一見類似しているものの、固結作用の程度とその性質はかなり異なっており、セメントの固結作用が圧縮特性に及ぼす影響に関しては、自然粘土とは別の手法で取り扱う必要があると考えられる。

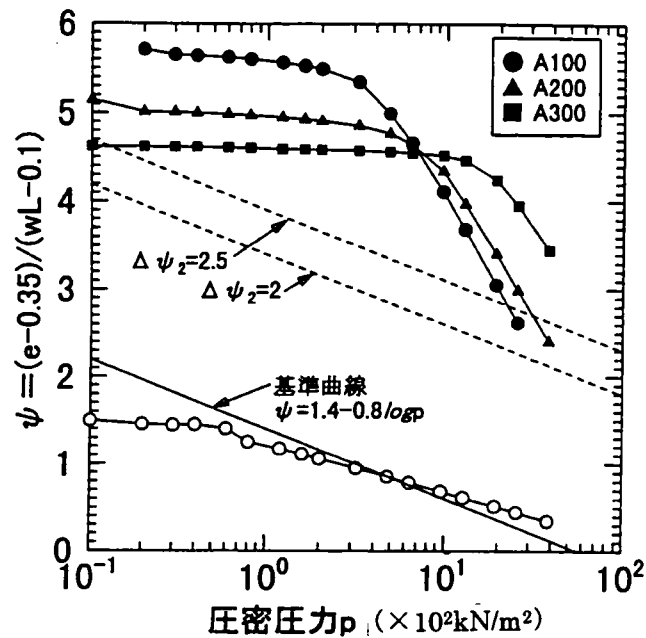


図 2-47 ψ と圧密応力の関係

(c) ソイルモルタルの圧密係数

ソイルモルタルによる人工処理地盤は含水比が高いため、外力を受けた時に圧密が生じるおそれがある。図2-48は、ソイルモルタルならびに廃泥の圧密係数と圧密圧力との関係を示す。

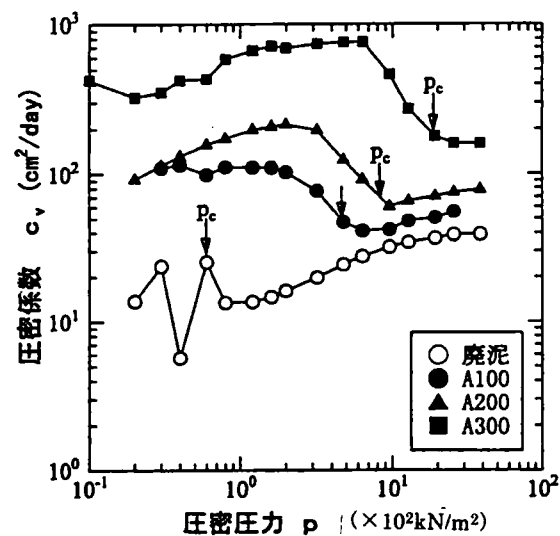


図 2-48 圧密係数と圧縮応力の関係

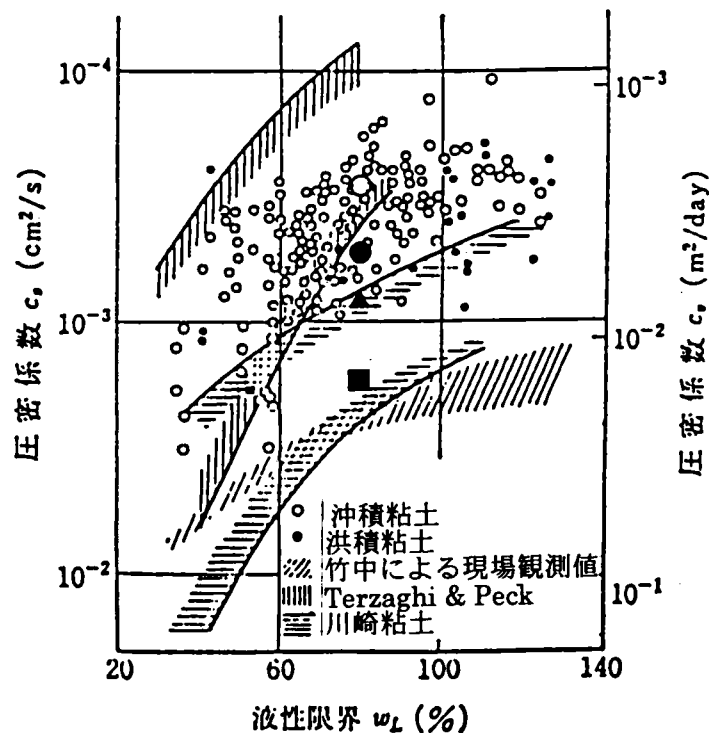
示したものである。なお、定ひずみ速度圧密試験では、圧密係数は次式によって求められる¹⁹⁾。

$$C_v = \frac{\Delta\sigma H_m^2}{2u_m \Delta t} \times 1440 \text{ (cm}^2/\text{day)} \quad (3.7)$$

ここに、 $\Delta\sigma$ は時間間隔 Δt の間の圧縮応力の変化、 H_m 、 u_m は Δt の間の供試体高さの平均値と間際水圧の平均値である。

ソイルモルタルの圧密係数はセメント混合量が多いほど大きくなる傾向が見られ、とくに、過圧密領域においてその傾向が強い。

図2-49は、自然粘土の圧密係数について概略の値を示したもので、洪積粘土の圧密係数は沖積粘土の圧密係数より若干小さくなる傾向が見られる。セメントを混合しないシルド排泥の圧密係数の概略値は $25\text{cm}^2/\text{day}$ ($2.8 \times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$) で、図2-49において沖積粘土の圧密係数の範囲に入っている。一方、ソイルモルタルの圧密係数は、A100 試料で $45\text{cm}^2/\text{day}$ ($5.2 \times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$)、A200 試料で $70\text{cm}^2/\text{day}$ ($8.1 \times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$) 程度で洪積粘土の圧密係数の値に近い。しかしながら、A300 試料では $150\text{cm}^2/\text{day}$ ($1.7 \times 10^{-3}\text{cm}^2/\text{s}$) で、図にも示されているようになり大きくなる。したがって、セメント添加量が少ない範囲に限れば、ソイルモルタルの圧密特性は洪積粘土の圧密特性にかなり近いといえる。



2-49 圧密係数と液性限界の関係

(4) ソイルモルタルの圧縮特性と強度特性の関係

図2-50は、ソイルモルタルの一軸圧縮強度と圧密降伏応力の関係を示したもので、今回の実験では、セメント添加量に関係なく

$$q_u = 0.717 p_c \quad (3.8)$$

の関係があることがわかる。土の非排水強度を、 $c_u = q_u/2$ とすれば、いわゆる強度増加率は、

$$c_u / p_c = 0.358 \quad (3.9)$$

となる。自然粘土の一軸圧縮強度では、一般に、 $c_u / p_c = 0.3 \sim 0.35$ 程度の値であり、ソイルモルタルの c_u / p_c は自然粘土に比べて若干大さめの値となる。

自然粘土の一軸圧縮試験では、試料採取や試料の成形にともなう応力解放や乱れの影響による強度低下が考えられるが、ソイルモルタルは強固な構造を有しているため、応力解放や乱れの影響を受けず大さめの強度を示しているものと考えられる。

一方、藤原らは、カオリン粘土を用いたソイルモルタルの一軸圧縮強度と圧密降伏応力の関係を求めており、

$$p_c = \frac{q_u}{0.0629 q_u + 0.435} \quad (3.10)$$

の関係を報告している¹⁶⁾。

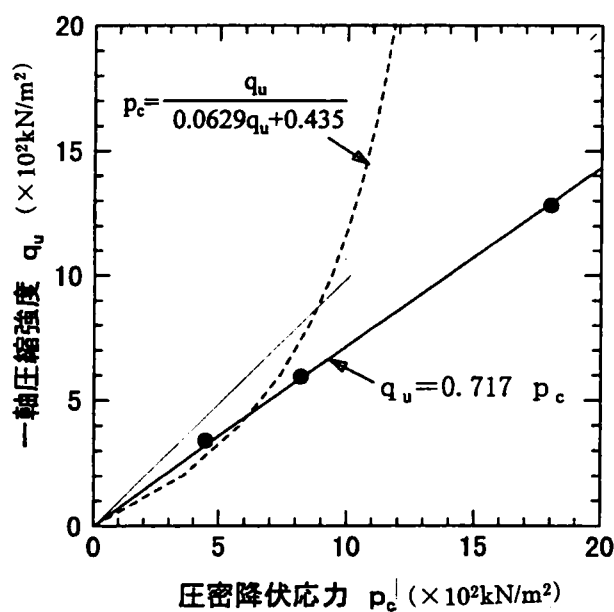


図2-50 ソイルモルタルの一軸圧縮強さと圧密降伏応力の関係

図2-50の点線は、式(3.10)の関係を示したもので、実験に使用した粘土試料の物性の影響もあろうが、今回の実験結果と傾向がかなり異なっており、 q_u がある程度大きくなると圧密降伏応力を越えるようになる。すなわち、外荷重に対して、強度としては十分に確保されているものの、変形的には外荷重による地盤内応力が圧密降伏応力を越えて大きな圧密沈下を引き起こす場合も考えられ、高含水比の土を対象とするセメント安定処理では、強度だけではなく、圧密降伏応力の評価も重要な問題となる。一般に、セメント混合土に対して圧密試験が行われることは少なく、一軸圧縮強度など限られた実験結果から圧密降伏応力を推測せざるを得ないことから、一軸圧縮強度と圧密降伏応力の関係については、種々の粘土試料を対象に、より詳細な研究が必要である。

(5) ソイルモルタルの圧縮特性における養生日数の影響

前項までの圧縮特性に関する評価は、養生日数 28 日の試料のみを対象に行った圧密試験をベースにしているが、ここでは、別の試料を用いて養生日数 7、15 および 28 日の時点で実施した圧密試験の結果を引用し、養生日数と圧密特性の関係について検討した。

以下、これまで述べてきた実験に供した試料 A に対し、ここで引用する実験試料を試料 B と称する。この試料 B はこれまでの試料 A と同様に大阪近郊で採取されたシルド排泥で、表2-18に示すように試料 A の物性に近い。表2-19に試料 B における配合条件を示す。試料 B の含水比は試料 A の含水比と同程度の 200% であり、セメントの混合量は 1m^3 あたりそれぞれ約 50kg、100kg および 200kg である。実験試料の作製方法、養生条件ならびに定ひずみ速度圧密試験の試験条件は試料 A と同じである。また表2-20に試料 B についての圧密試験の結果をまとめて示す。この試験結果より、養生期間が圧縮特性に与える影響について、図2-51～図2-54を参照して以下のように整理した。

- ① 図2-51は、それぞれの養生日数におけるソイルモルタルの圧縮曲線を示したものである。いずれの養生日数においても、試料 A と同様の結果が得られている。
- ② 図2-52は、それぞれのセメント混合量に対して、養生日数の影響を調べたもので、養生日数が長くなるにつれて、圧縮曲線は圧力が増加する方向にほぼ水平移動していることがわかる。すなわち、養生日数が長くなるにつれて、圧密降伏応力は大きくなるが、圧縮指数はほとんど変化しないということになる。
- ③ 図2-53はセメント混合量と圧密降伏応力の関係を示したもので、試料 A と B の物性が近いので、圧密降伏応力の値も同じような値となっている。また、試料 A、B とともに、セメント混合量が増加するに従い、圧密降伏応力が増加する割合が大きくなる傾向が見られる。
- ④ 図2-54は、試料 B における養生日数と圧密降伏応力の関係を示したもので、圧密降伏応力は養生期間の初期において急速に増加するとみられ、7 日以降の増加は少ない。

⑤ 図2-55は圧縮指数とセメント混合量の関係を示したもので、セメント混合量が多なるに伴い圧縮指数は小さくなるものの、ある程度セメント混合量が多くなると一定値に落ち着く傾向が見られる。また、圧縮指数においては養生日数の影響は見られない。以上の結果から、ソイルモルタルの圧縮特性は、セメントを添加後の短期間でほぼ一定の状態に落ち着くことがわかる。

表 2 - 1 8 試料Bの物理特性

粒 度 特 性	粗粒分 (425 μ m 以上)	%	1
	細粒分 (74~425 μ m)	%	2
	シルト分 (5~74 μ m)	%	69
	粘土分 (5 μ m 以下)	%	28
コンシ テンシー 特性	液性限界		73.5
	塑性限界		29.5
	塑性指数		44.0
	土粒子の比重	G _s	2.646

表 2 - 1 9 試料Bの配合特性

試 料 名			B50	B100	B200
密 度	土粒子 γ_s	t/m ³	2.65		
	セメン γ_c		3.21		
	水 γ_w		1.00		
質 量	土粒子 W _s	kg	414.084	407.829	395.869
	セメン土 W _c		49.232	96.979	188.270
	水 W _w		828.168	815.658	791.738
	試料全体 W		1291.485	1320.466	1375.877
体 積	土粒子 V _s	m ³	0.156	0.154	0.150
	セメン土 V _c		0.015	0.030	0.059
	水 V _w		0.829	0.816	0.797
	試料全体 V		1.000	1.000	1.000
密度 γ		t/m ³	1.291	1.320	1.376
実質部密度 γ_{cs}		t/m ³	2.709	2.744	2.795
含水比 W _w /W _s		%	200.0	200.0	200.0
水セメント比 W _w /W _c			16.281	8.411	4.205

表 2 - 2 0 試料Bの圧縮特性

試 料	セメント添加量 (kg/m ³)	養生日数 (日)	圧密降伏応力 (kN/m ²)	圧縮指数
B50	49.23	7	2.3	2.464
		15	2.9	2.623
		28	3.7	2.457
B100	96.98	7	3.9	2.111
		15	5.1	2.253
		28	6.2	2.043
B200	188.27	7	12.5	1.937
		15	13.0	2.076
		28	15.0	2.950

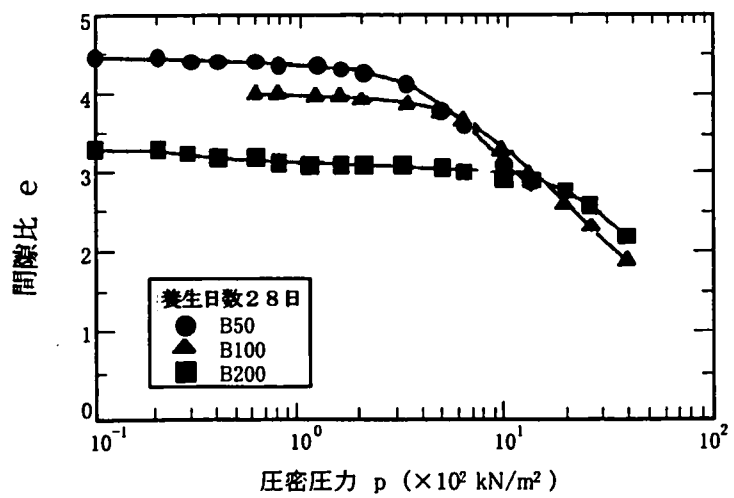
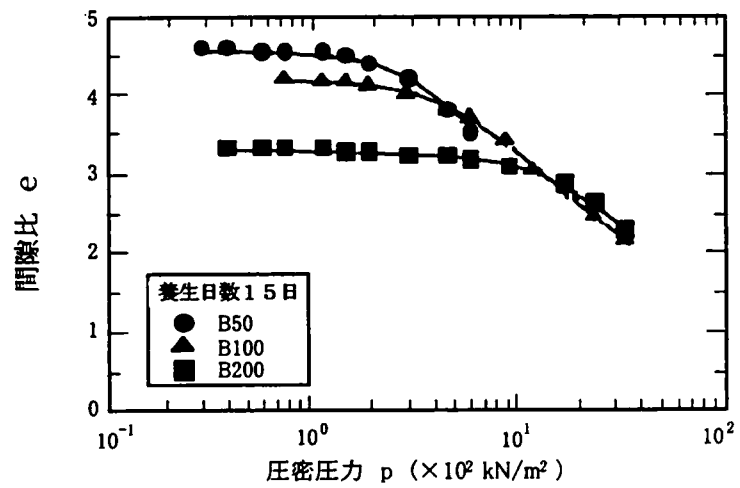
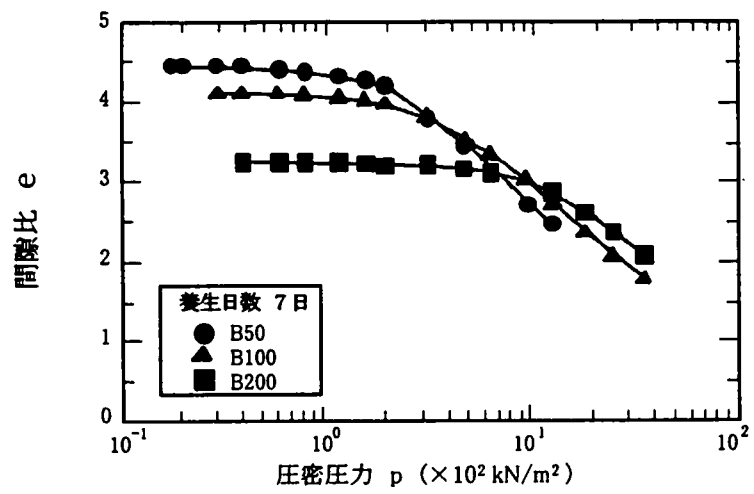


図 2-5 1 養生日数の違いによるソイルモルタルの圧縮曲線

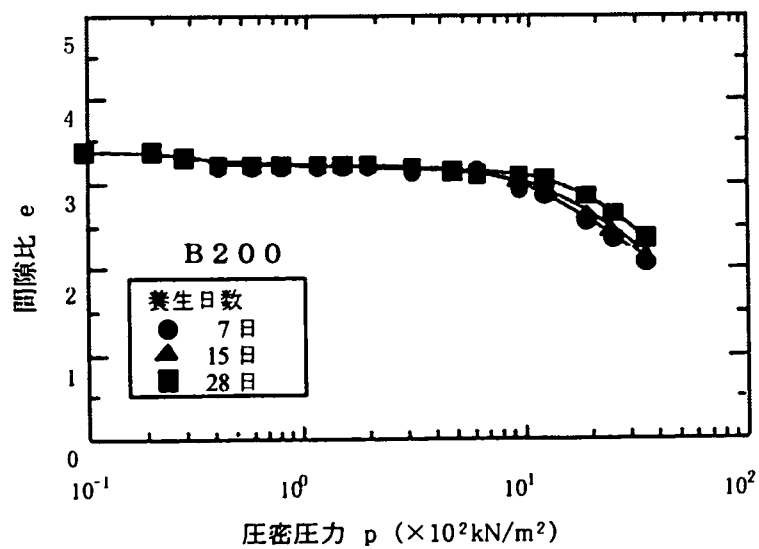
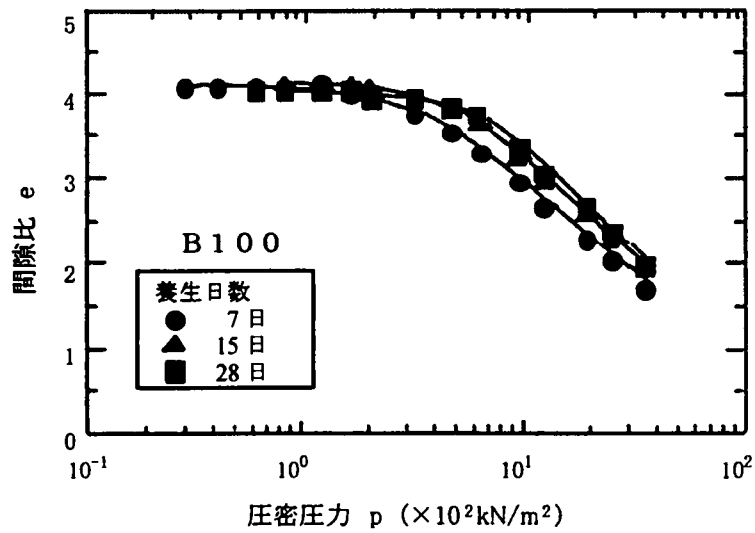
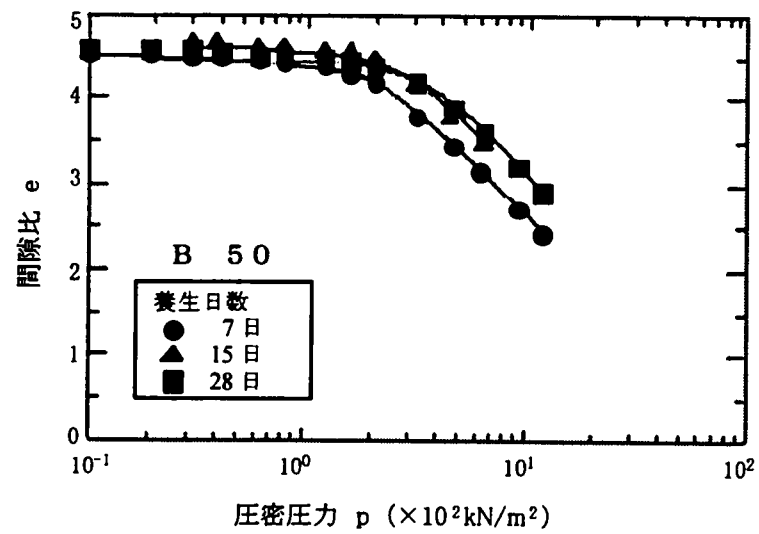


図 2-52 セメント量の違いによるソイルモルタルの圧縮曲線の時間変化

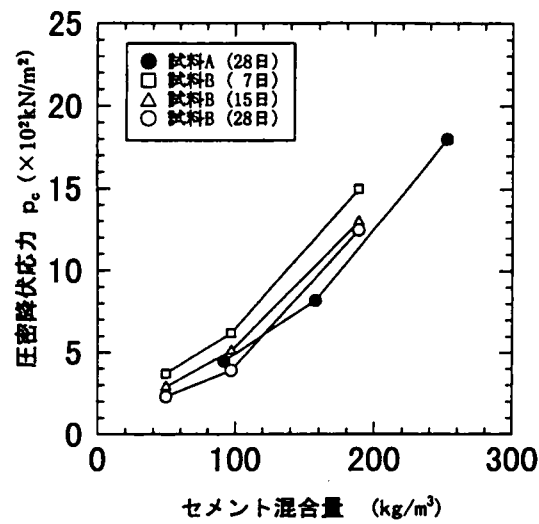


図 2-53 セメント混合量と圧密降伏応力の関係

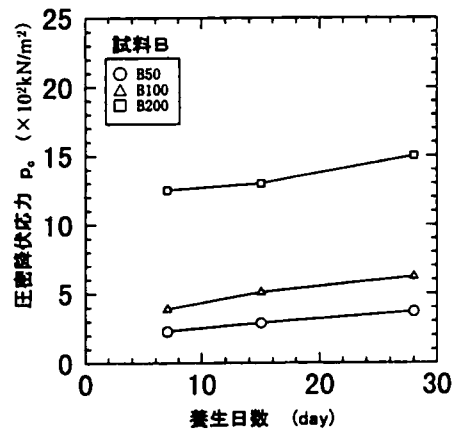


図 2-54 試料 B における養生日数と圧密降伏応力の関係

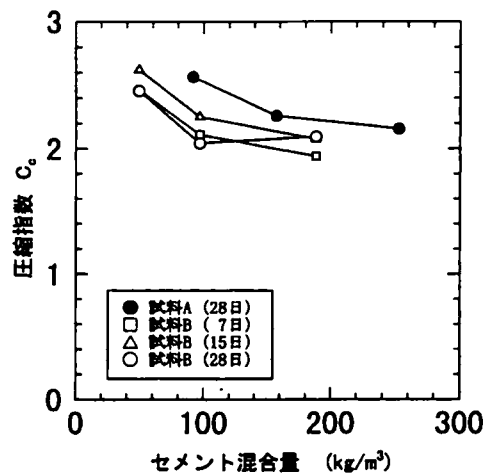


図 2-55 圧縮指数とセメント混合量の関係

2.5.4 ソイルモルタルの透水特性

前節で行った定ひずみ速度圧密試験からは土の透水係数を直接求めることはできないが、

$$k = c_v m_v \gamma_w \quad (3.11)$$

として求めた透水係数の値を図2-56に示す。

なお、式(3.11)における m_v は体積圧縮係数である。ソイルモルタルの透水係数は、過圧密領域においてはほぼ一定で、セメント混合量の影響はほとんど見られない。ただし、圧密降伏後は、圧密応力の増加にともなう間隙比の減少により、透水係数が低下する傾向が見られ、その割合はセメント混合量の少ないものほど大きい。いずれにしてもソイルモルタルの透水係数は、セメントを混合しない土の透水係数より大きいものの、 $1.5 \times 10^{-2} \text{cm/day}$ ($1.7 \times 10^{-7} \text{cm/s}$) 以下であり、止水効果は十分期待できるといえる。

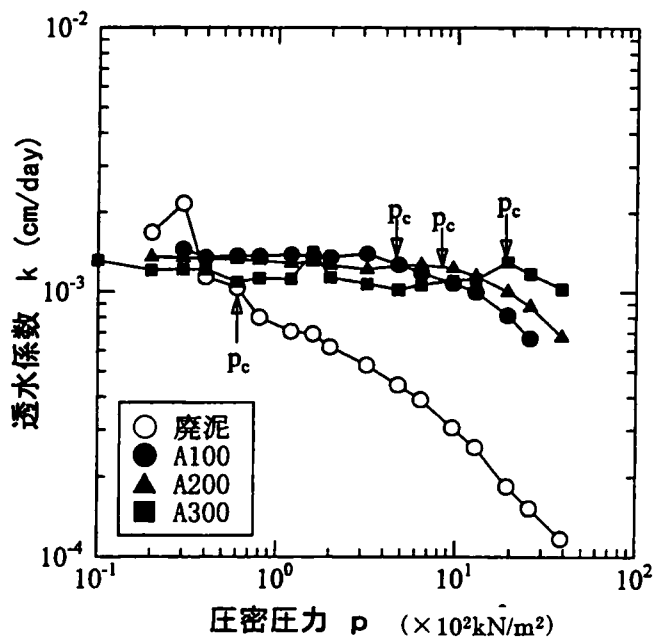


図2-56 透水係数と圧密圧力の関係

2. 6 ソイルモルタルによる表面遮水工法の研究開発

本論文の研究対象であるソイルモルタルや流動化処理土は、他の地盤安定処理工法に比べて相対的に建設発生土の利用割合が低く、その結果として含水量が多くなるため、ひび割れが地盤構造物の機能に与える影響についても検討しておく必要がある。

もちろん一般的な地盤空洞の埋戻し・充填では、ソイルモルタルは地盤内にあるため含水比が地盤とほぼ同程度に保たれていると考えられ、乾燥に伴うひび割れに至ることはなく、設計上問題になることはない。一方、例えば、ソイルモルタルを本章2. 2. 4で述べた表層遮水層として使用する場合には、その影響を無視することはできないことになる。

また、管理型の廃棄物最終処分場に求められる止水シート下層部としての遮水層に用いる場合には、ひび割れの問題だけではなく、斜面における均一な表層形成のための施工性も重要な要素となる。

本節では、これらの課題に着目して行った、ソイルモルタルのひび割れと斜面流下特性に関する研究成果について述べることにする。

さらに、表面遮水の場合は、全体のボリュームに対して体積～表面積比が大きく、表面からのアルカリ成分の流出が懸念されるので、その点にもついても本節で触れることにする。

2. 6. 1 ひび割れ発生のメカニズムに関する基礎実験結果

(1) ひびわれ発生のメカニズム

ソイルモルタルのひび割れは、主にプラスチック収縮ひび割れと乾燥収縮ひび割れの2つが原因と考えられる。このうちプラスチック収縮ひび割れは、以下のようなメカニズムで発生する。

ソイルモルタルがまだプラスチックな状態にある間(凝固・収縮過程)に、ブリージング(材料分離)が起これ、ソイルモルタル表面より上に水膜を形成する。この水膜が、乾燥を受けソイルモルタル表面まで低下し、水の表面張力による引張応力が固体粒子間に発生するが、その引張収縮応力によるソイルモルタルの収縮が種々の原因で拘束され、かつ収縮応力がソイルモルタルの引張強度より大きくなった場合にひび割れを生じる。このプラスチック収縮ひび割れは、表面上に浅く発生するだけなので、それ自体だけではソイルモルタルの水密性を保つ上で問題にはならない。

一方、乾燥収縮ひび割れは、比較的深いひび割れが生じるので著しく遮水機能が低下する危険性があるが、その発生のメカニズムは以下のとおりである。

ソイルモルタルの硬化後に乾燥に伴ってセメントペースト中の吸着水(ゲル水)が逸散し始め、ゲル質相互の間隔およびゲル質と結晶質との間隔が収縮を起こす。とくに今回の研究対象である粘土系のソイルモルタルでは、本章2. 1. 2でも述べたように、セメントと粘土粒子間のサスペンションを形成する水分子が多量であることもあって、収縮の割合は通常の流動化処理

土に比べ大きいことが想定される。そして、この相対的に大きい収縮が拘束され、収縮応力が引張強度を上回れば、乾燥収縮ひび割れが発生することになる。このことから、乾燥収縮によるひび割れの生じやすさの要因は、自由収縮率(拘束がない場合の体積変化率)、弾性ひずみと塑性ひずみ(材料の持つ引張強度)および拘束条件から成り立ち、

$$\text{自由収縮率} \geq \text{弾性ひずみ} + \text{塑性ひずみ} + \text{拘束緩和率}$$

の条件を満たす場合にひび割れが発生すると言える。すなわち、拘束条件が同じ場合は乾燥収縮しやすいほど(乾燥収縮度が大きいほど)、また、引張強度が小さいほど、ひび割れが発生しやすい。

コンクリートの場合、乾燥収縮度に最も大きな影響を及ぼすものは、コンクリート中に占める骨材の割合である。Pickett は、図2-57に示すような実験結果から、収縮はコンクリート中のセメントペースト(水+セメント)の容積の関数で表されるとして、式(3.12)を提案した²²⁾。

$$Sc = Sp(1-a)^n \quad (n=1.2\sim 1.7) \quad (3.12)$$

ここで、

Sc : コンクリートの収縮

Sp : セメントペーストの収縮

a : 骨材の絶対容積 ($1-a$: セメントペーストの容積)

このことは、骨材がセメントペーストの収縮を妨げることを示している。

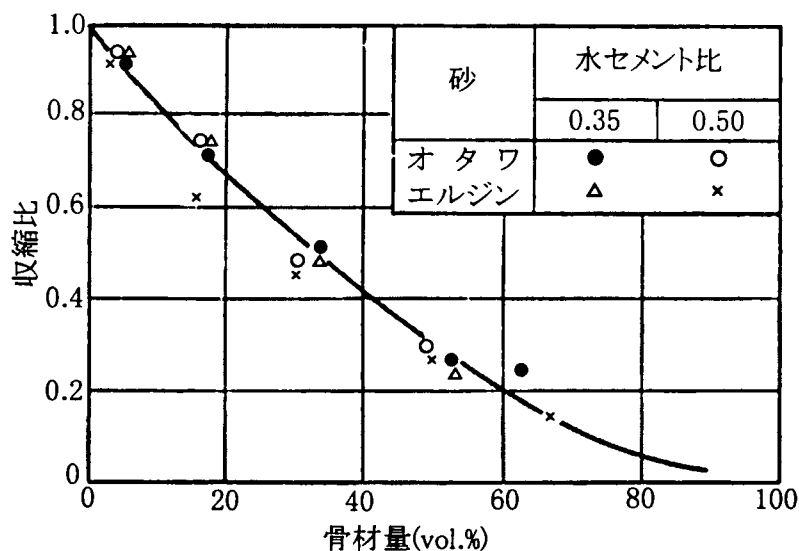


図2-57 コンクリートにおける骨材の容積率の乾燥収縮に及ぼす影響²²⁾

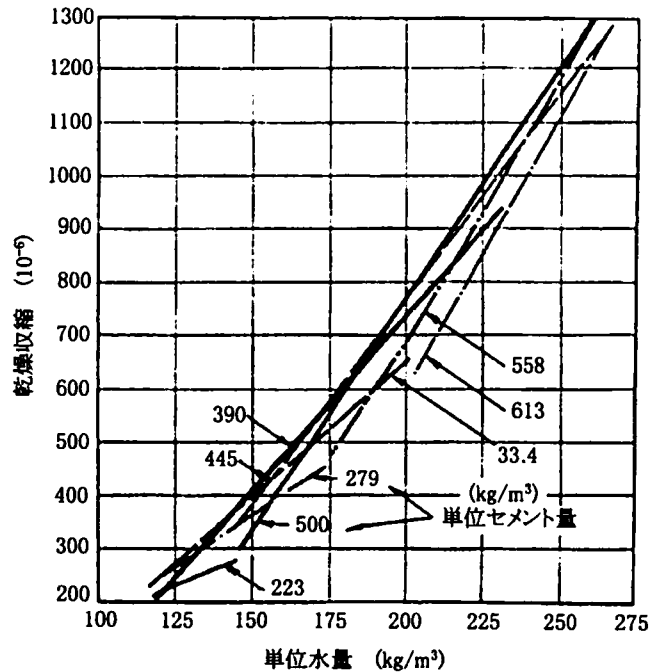


図 2-58 コンクリートの単位水量および単位セメント量が乾燥収縮に及ぼす影響²³⁾

また、図2-58にも示すように、単位水量が多いほど乾燥収縮度が大きくなるという説もあるが²⁵⁾、単位骨材量との関連において収縮を考えてみると、単位水量が増大すると収縮を妨げる効果のある骨材量が減少するので、収縮が増大するとも考えられる。前述した Pickett の説に従うならば、単位水量そのものは収縮に影響をおよぼす第一義的要因にはならないことになる。

この理論をソイルモルタルに当てはめれば、単位土量(コンクリートでいうところの単位骨材量)が多いほど乾燥収縮度は小さくなることになる。

一方、ソイルモルタル自体の引張強度に影響を及ぼす因子は、コンクリートと同様に考えれば水セメント比であるから、ソイルモルタルのひび割れに影響を及ぼす因子は水セメント比で、ひび割れを生じ難くするためには水セメント比を小さくすればよいことになる。

(2) ソイルモルタルのひび割れ発生実験結果

(a) 実験概要

前項で述べたようなひび割れに関する考察をを前提に、ソイルモルタルのひび割れ特性を確認するための室内試験を行った。試験に用いた発生土の粒度組成を図2-59に示す。この発生土を用いての配合は、表2-21に示すとおりである。

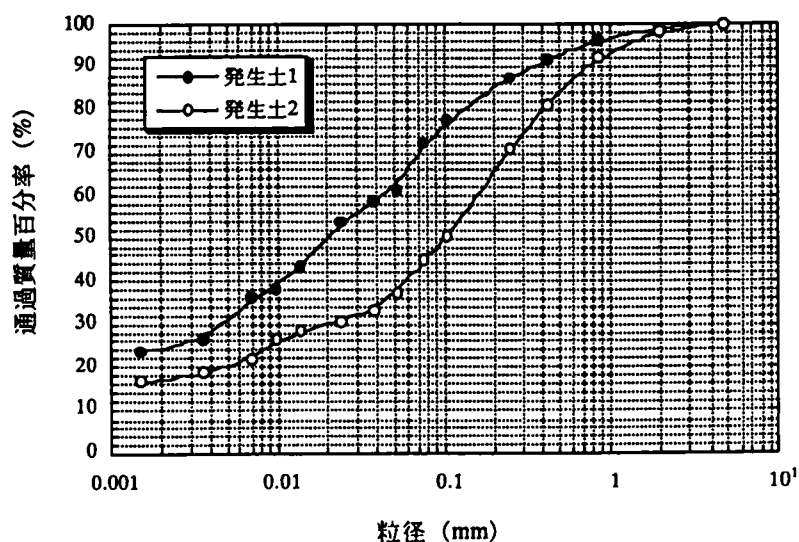


図 2-59 ひび割れ試験に用いた発生土の粒度分布

表 2-21 ひびわれ試験における配合

配合 条件	発生土体積 $V(m^3)$		発生土重量 $W(kg)$		固化材重量 $C(kg)$	加水量 $W_i(kg)$	総水量 $W_t(kg)$
(1)	0.40		640		100	568	727
(2)	0.40		640		200	537	693
(3)	0.50		800		100	468	667
(4)	0.50		800		200	437	635
(5)	0.60		960		100	368	606
(6)	0.60		960		200	337	575
(7)	0.70		1120		100	268	546
(8)	0.70		1120		200	237	514
(9)	0.80		1280		100	168	486
(10)	0.80		1280		200	137	454
(11)	0.79		1264		150	162	476
(12)	0.21		336		250	711	794
(13)	1.00		1600		0	0	397
	C/W_1	C/W_2	W/W_1	W_2/W_1	総容積(ℓ)	総重量(kg)	処理土比重
(1)	0.138	0.176	1.126	0.662	1000	1308.00	1.31
(2)	0.288	0.373	1.193	0.692	1000	1376.51	1.38
(3)	0.150	0.214	1.708	0.902	1000	1368.35	1.37
(4)	0.313	0.458	1.833	0.942	1000	1436.51	1.44
(5)	0.165	0.272	2.607	1.190	1000	1428.25	1.43
(6)	0.348	0.594	2.853	1.256	1000	1796.51	1.50
(7)	0.183	0.373	4.175	1.542	1000	1488.25	1.49
(8)	0.389	0.846	4.736	1.637	1000	1556.51	1.56
(9)	0.206	0.594	7.608	1.981	1000	1548.25	1.55
(10)	0.440	1.465	9.377	2.119	1000	1616.51	1.62
(11)	0.315	0.924	7.784	1.997	1000	1576.38	1.58
(12)	0.315	0.352	0.473	0.318	1000	1296.63	1.30
(13)	0	---	---	3.030	1000	1600.00	1.60

ひび割れ試験は、内径 100mm、高さ 20mm の円筒型のアクリルパイプ内に所定配合のソイルモルタルを充填し、28 日後に供試体中央部のひび割れ深さ、および供託体と型枠の

間の隙間を測定した。その試験方法・手順の概要は図2-60に、また実験状況は写真2-3に、それぞれ示す通りである。

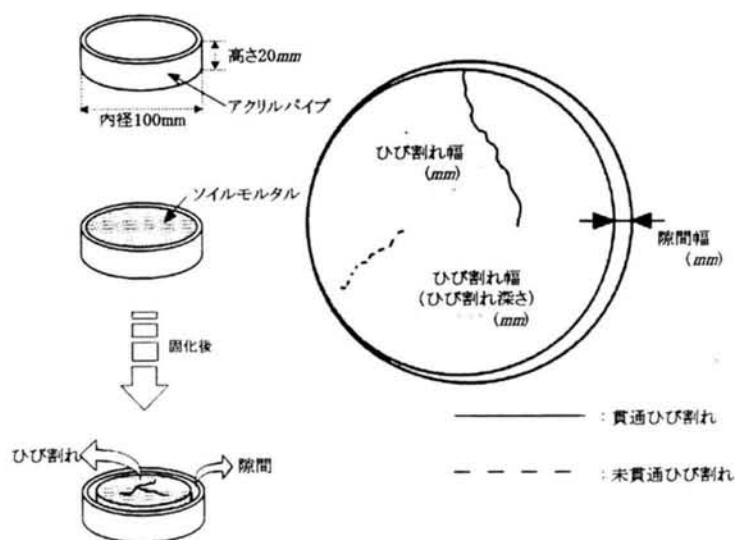


図2-60 ひび割れ試験の試験・観察方法



写真2-3 配合条件とひび割れに関する実験状況

(b) 実験結果とその考察

図2-61に示したひび割れ状況の観察結果より、ひび割れは生じてもほとんどが深さ 10 mm 以下で、試料高さ 20mm の下部まで達しているものはなく、またセメント量が、 $50\text{kg}/\text{m}^3$ を越えるとひび割れは生じたものはないことがわかった。ただし、容器との境部の隙間は容器下部まで達していることから、打設面が広大な場合、初期の収縮時に深さ 20mm を越えるひび割れが生じる可能性があることも予想される。ひび割れ発生状況について写真2-4に示した。

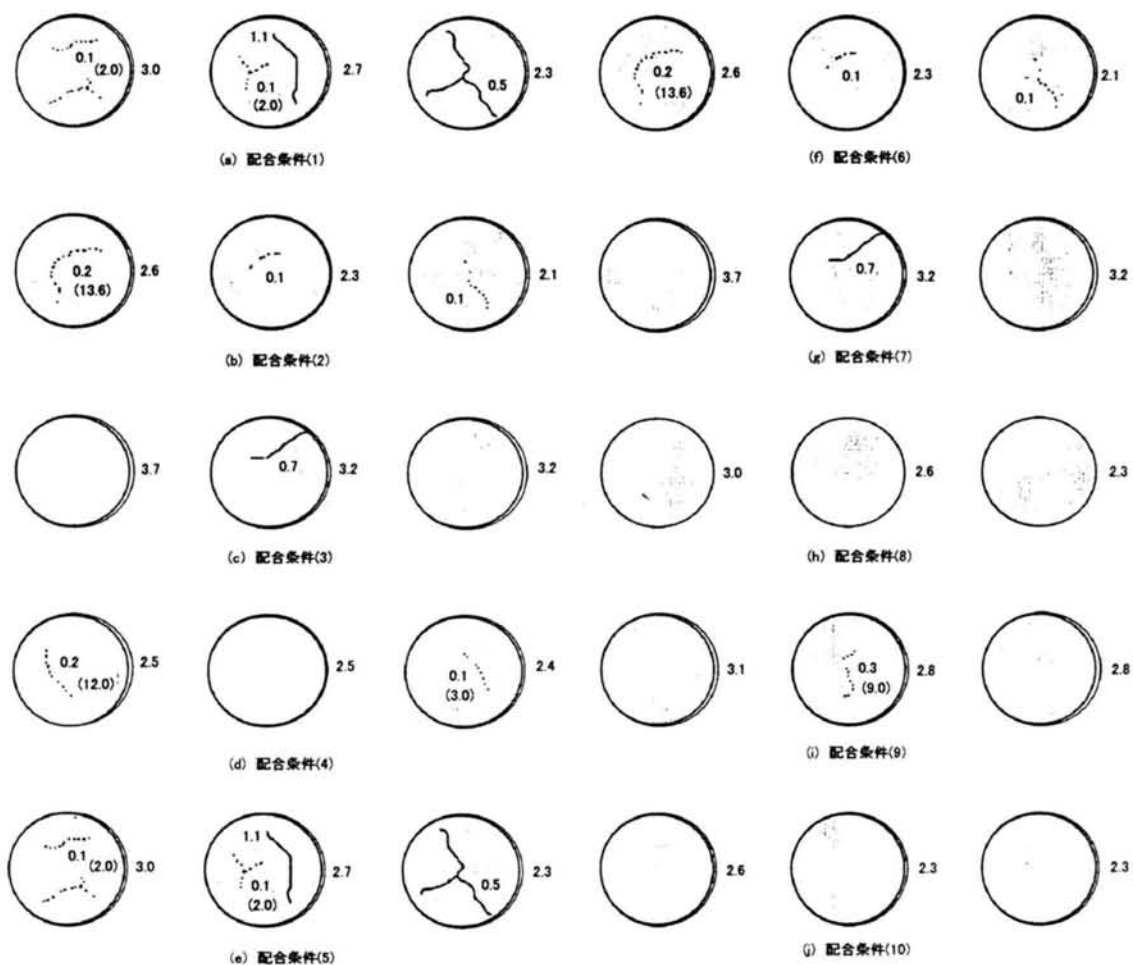


図 2 - 6 1 ひび割れ観察結果

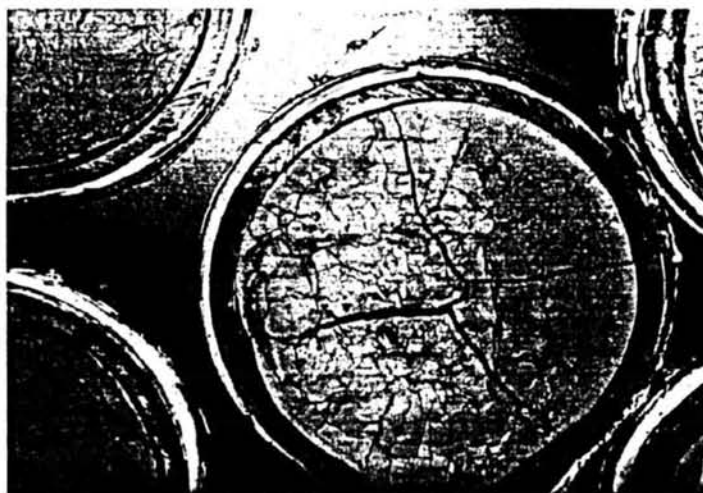
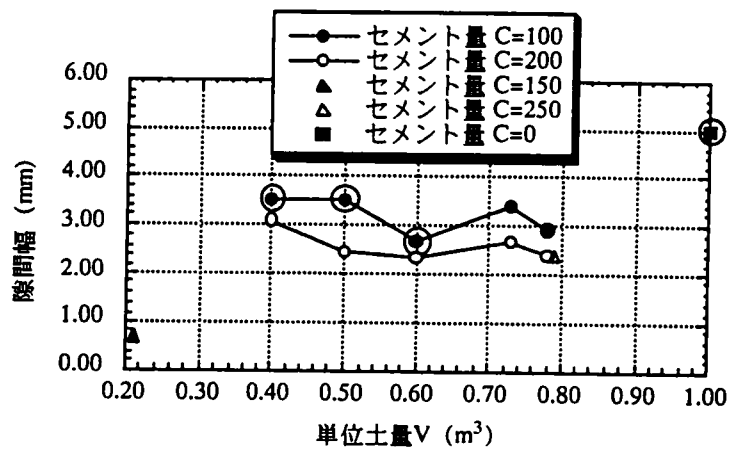
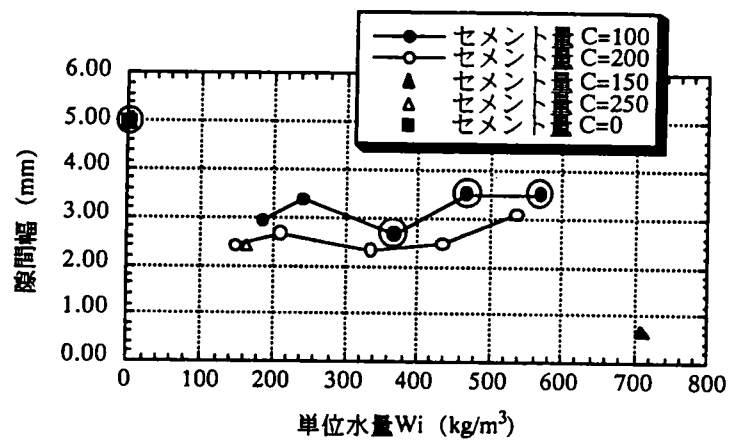


写真 2 - 4 ひび割れ発生状況

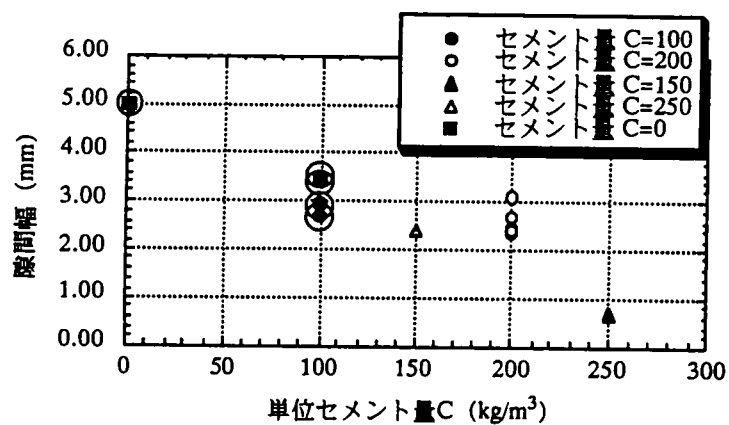
一方、ひび割れ隙間幅と、配合の単位水量、単位土量および単位セメント量との関係を、図2-62に整理した。



(a) 単位土量と間隙幅の変化



(b) 単位水量と間隙幅の変化



(c) 単位セメント量と間隙幅の変化

図 2-6 2 ひび割れ試験におけるひび割れ間隙幅測定結果

(c) ひび割れ発生の要因とその制御

これらの試験結果の整理から、ひび割れの発生および制御の要因について以下のような結果が得られる。

- ① 乾燥収縮は単位土量の増加で小さくなる
- ② ソイルモルタルの引っ張り強度は、単位セメント量の増加で大きくなる
- ③ ソイルモルタルでは単位セメント量の効果の方が単位土量の増加の効果に比べて大きいので、ひび割れの発生を抑えるには、まず単位セメント量を大きくするのが最も効果的である。
- ④ 次に、単位土量を増加させるのがよいが、土を増やしすぎると流動性が失われてしまうので、所要のワーカビリティが得られる範囲内で単位土量を増加させればよいことがわかる。

以上のことを模式的に示したものが、図2-63である。

また、実際の施工に際しては、ひび割れ対策として以下のような点が考えられる。

- ① 打設後発生したひび割れ部を充填するように、ソイルモルタルを再度打設する。
(ひび割れ試験結果から、その後に生じるひび割れは深さ 10mm を越えることはないと予想される。)
- ② シート敷設まで乾燥しないように散水等を行う。
- ③ 場合によってはセメント量を 150kg/m^3 以上とする。

なお、以上の試験結果ならびに考察は、ソイルモルタルの硬化過程で気乾養生したものがベースとなっているが、打設後ある期間水中養生し強度を発現させた後、乾燥収縮を認めるような過程を経れば、引張強度の増加によりひび割れの発生程度はかなり抑制されることになろう。現実の施工に当たっては、養生方法など現場の状況に即したひび割れ試験を行い、ソイルモルタル配合決定の要因とする必要がある。

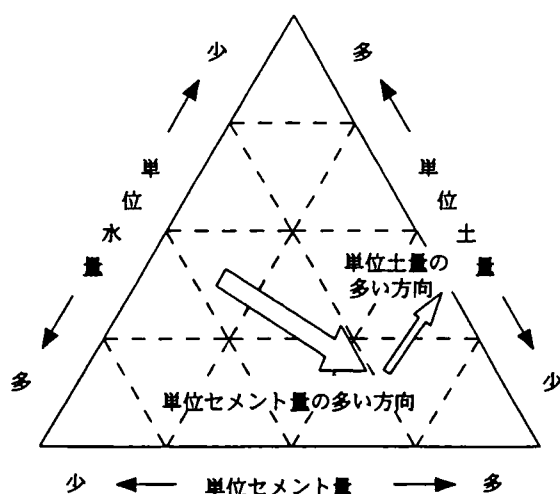


図2-63 ひび割れを生じさせないための方策

2. 6. 2 斜面表層遮水層構築に関する基礎実験結果

本章2. 2. 4(2)で述べたように、例えば産業廃棄物最終処分場に要求されるソイルモルタルを用いての表層遮水工法については種々の方法が考えられるが、そのうち最も原始的で効率的な、しかしいくつかの問題が予想されるであろう自然流下方式について基礎的な実験を行ったので、その成果について述べるものである。

(1) 基礎実験

(a) 実験方法

一次元的に勾配のある水路にソイルモルタルを打設流下させた場合の固化状況を観察しようとするもので、図2-64に示すような木製の水路内に隔壁を設け、その隔壁より上流側にソイルモルタルを充填し、隔壁を瞬間的に引き上げてソイルモルタルを流下させる方法を採用した。この実験に関する諸元を表2-22に、実験状況を写真2-5にそれぞれ示す。

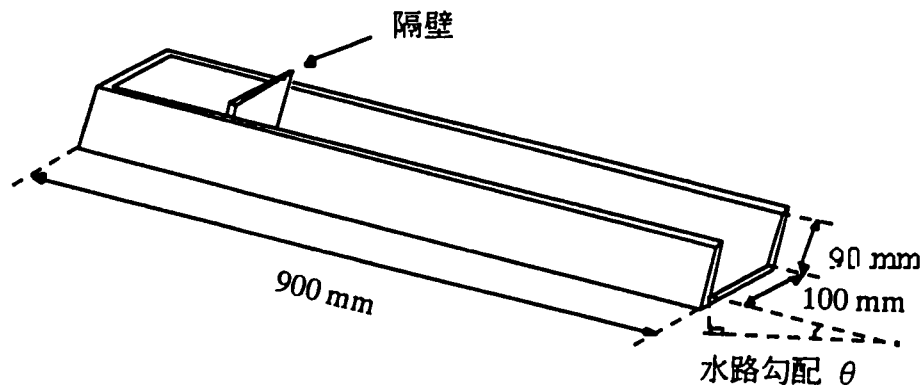


図2-64 水路概略図

表2-22 水路打設実験の諸元

水路勾配	0°	15°	30°	45°
水路幅	B=100mm			
配合条件	単位土量（第3章ひび割れ試験に同じ） 1080kg			
	単位セメント量（普通プルランド） 100kg			
	単位水量（水道水） 368kg			
	フロー値（公団方式） 211mm			
打設体積(cm³)	2070	700	700	410
隔壁位置の水深(cm)	9.0	6.1	9.0	9.0

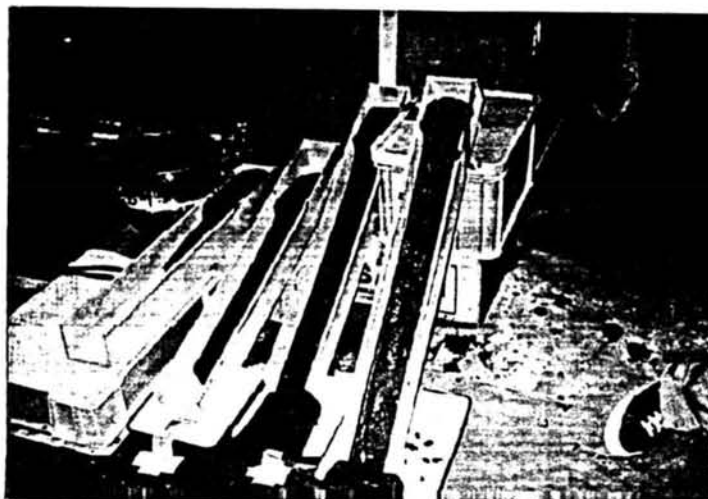


写真 2-5 水路打設実験

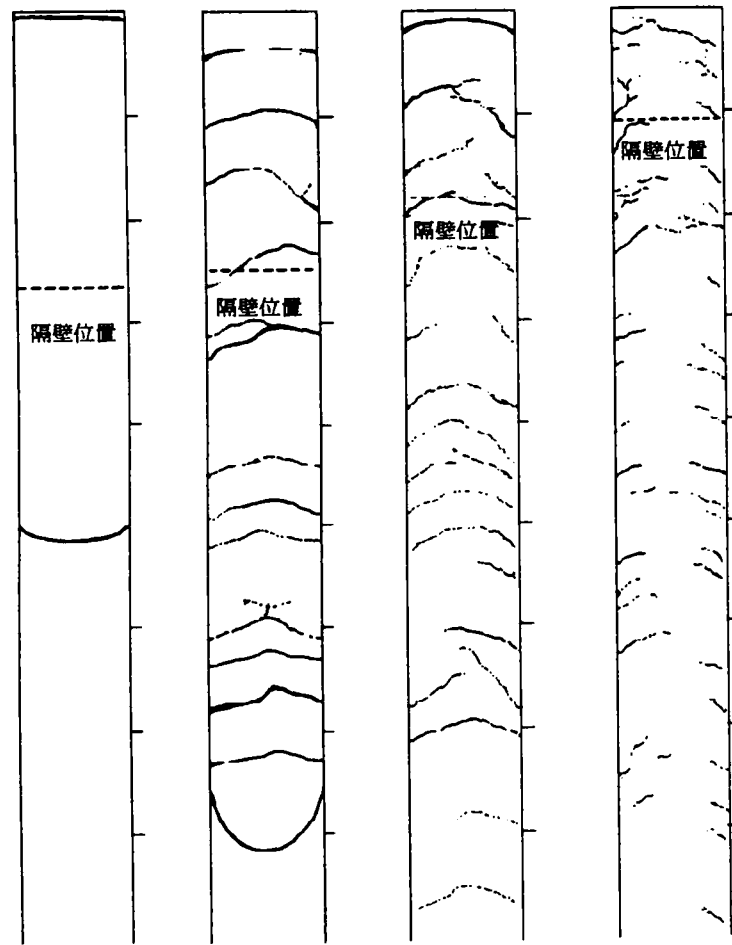
(b) 実験結果とその考察

実験結果を、表2-23 に総括した。また、それぞれの勾配におけるひび割れの発生状況は、図2-65に示すとおりである。

表 2-23 水路実験結果総括表

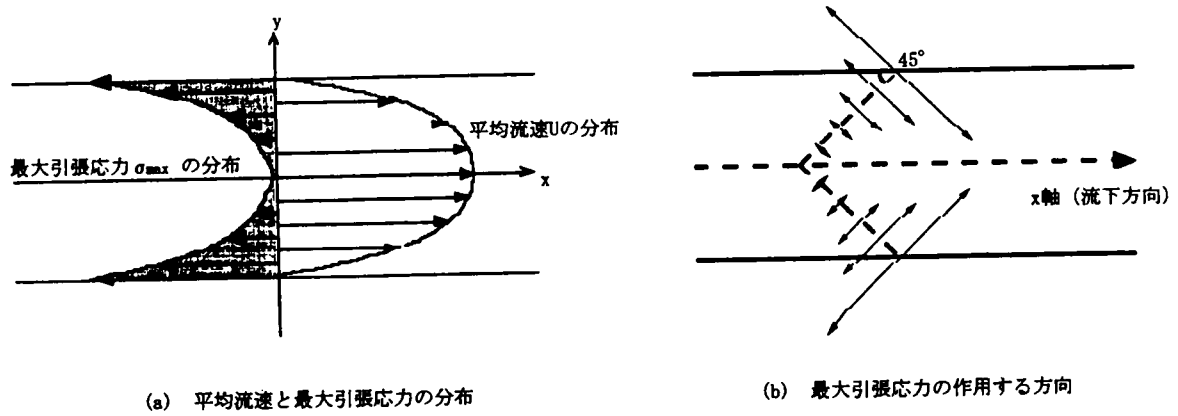
勾 配		0°	15°	30°	45°
打設長さ(cm)		50	80	流下	流下
打設高さ(mm)		40.0	12.0	4.5	3.0
ひび割れ	本数	—	約 10 本	約 20 本	約 20 本
	最大幅(mm)	—	2.4	0.4	0.3
	端部角度 (°)	—	65	46	45
	状況	微小表面のみ	太くはっきり	細く横断	中央部無し

これらのひびわれは打設後 10 日のものであり、固化が進行していく過程でひび割れが発達していく途中の状態であった。例えば 45° のケースを見ても、ひび割れは水路側壁から徐々に中央部に向かって発達していくことがわかる。その理由としては、乾燥収縮時の側部の拘束により発生した引張応力が引張強度を上回ったことと、ソイルモルタル流動時のせん断応力解析によると、図2-66(a)、(b)に示すような最大引張応力分布が発生するが²⁶⁾、それが固化過程においても残留し引張破壊に至るものとが合わさって、端部に卓越するものと考えられる。流路端部におけるひび割れと壁軸との角度も後者の現象の現れであろう。



(a) 勾配 0° (b) 勾配 15° (c) 勾配 30° (d) 勾配 45°

図 2-65 ひび割れ発生状況



(a) 平均流速と最大引張応力の分布

(b) 最大引張応力の作用する方向

図 2-66 残留引張応力の解析結果

(2) 人工斜面へのソイルモルタル打設実験

前項2. 6. 1のひび割れに関する基礎実験では配合によるひび割れ状況の違いを、また前述の斜面流動化に伴うひび割れ発生に関する基礎実験では、配合が一定で一次的に勾配だけを変えた水路を対象に、斜面にソイルモルタルを流下させた場合のひび割れ等の挙動確認を、それぞれ検討した。

ここでは、それらの経緯を踏まえて総合的に検討する意味で、人工斜面上に配合条件と勾配との両方の条件を変化させて、かつ、施工条件を考慮し2種類の方法で打設し、そのひび割れ状況と打設状況を見ることにより、ひび割れが発生しにくく、また、最も効率的施工が可能な条件を探ることを目的とした。

(a) 実験方法

上述のように実験のパラメーターとして、

- ・勾配：15度および30度の2ケース（幅100cm、長さ150cmのベニヤ板使用）
- ・配合：[発生土量3ケース] × [セメント量2ケース] = 6ケース（表2-24参照）
- ・方法：直接流下打設および階段状打設の2ケース（図2-67参照）

このうち30度のケースでは、両方の方法ともセメント量100kgについて省いているので、計20ケースの組合せについて試験を行ったことになる。

実験の手順については以下の通りである。

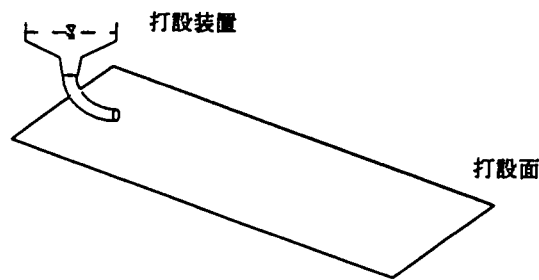
- ① ミキサー（20リットル）内に、水、セメント、土の順で投入、攪拌し15リットルのソイルモルタルを作成する。
- ② 作成直後のフレッシュな状態での流動性を、公団フロー値^{注1}で測定する。
- ③ 直接流下および階段状の2通りの方法で、5リットル打設する。
- ④ 打設から1日後に5cm四方ごとに設けた打設ポイントでの打設高さを計測する。
- ⑤ 打設から14日後に、ひび割れ状況を観察、計測する。

表2-24 ソイルモルタル配合条件

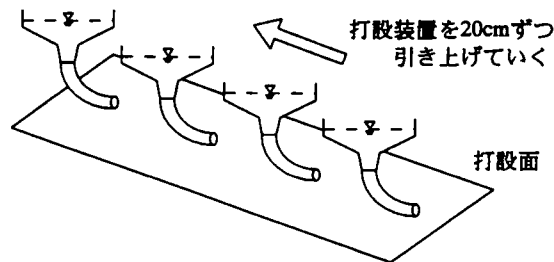
配合条件	発生土体積 (m ³)	発生土重量 (kg)	固化材重量 (kg)	加水量 (kg)	総水量 (kg)
①	0.40	720	100	568	726
②	0.40	720	200	537	694
③	0.50	900	100	468	665
④	0.50	900	200	437	633
⑤	0.60	1080	100	368	605
⑥	0.60	1080	200	337	573

[注1：公団式フロー]

日本道路公団規格「エアーモルタル及びエアーミルクの試験方法」のうち、コンシステンシー試験方法のシリンダー法を準用するもので、内径および高さ80mmの金属製シリンダーに充填された試料が、シリンダーの引き上げによって広がる範囲（最大径と直交径の平均：差が20mm以内を前提）で評価するもの。



(a) 打設方法Ⅰ：直接流下打設



(b) 打設方法Ⅱ：階段状打設

図 2-67 打設方法

(b) 実験結果とその考察

実験結果として、ソイルモルタル打設時の公団フロー、打設範囲（ポイント数）、平均打設高さおよびひび割れ発生状況（流下方向に平行に設けた幅 50cm の測定域内）を、表 2-25～28 に示す。

i) 打設状況と公団フロー値との関係

斜面に対する打設状況は、当然のことながらソイルモルタルの流動性に大きく影響される。そのひとつの指標が公団フロー値ということが出来るが、例えば、平均打設高さとフロー値の関係を図 2-68 に示しているが、きわめて有意な相関性が見られる。

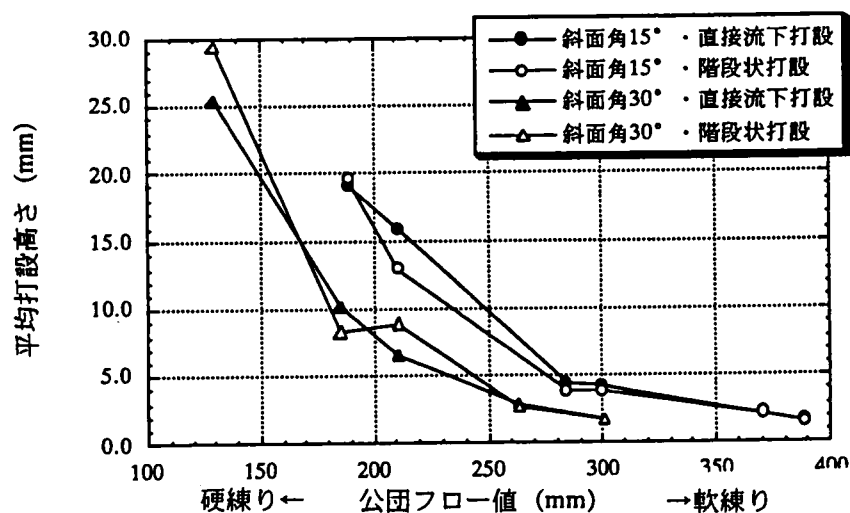


図 2-58 平均打設高さと公団フロー値の関係

表 2-25 ソイルモルタル打設時の公団フロー

配合条件	勾配 15°	勾配 30°
①	388	——
②	370	——
③	300	301
④	284	263
⑤	211	211
⑥	189	185

表 2-26 打設範囲（ポイント数）

配合条件	打設方法Ⅰ（直接流下）		打設方法Ⅱ（階段状）	
	勾配 15°	勾配 30°	勾配 15°	勾配 30°
①	211	——	147	——
②	189	——	196	——
③	190	227	173	171
④	214	135	170	139
⑤	105	110	122	133
⑥	96	115	96	132

表 2-27 平均打設高さ

配合条件	勾配 15°		勾配 30°	
	直接流下	階段状	直接流下	階段状
①	1.7	1.6	——	——
②	2.2	2.3	——	——
③	4.2	3.9	1.8	1.8
④	4.5	3.9	3.0	2.8
⑤	15.9	12.9	6.5	8.9
⑥	19.0	19.6	10.1	8.4

表 2-28 ひび割れ発生状況

配合条件	ひび割れ本数(50cm 幅当たり)				ひび割れ幅(mm)			
	勾配 15°		勾配 30°		勾配 15°		勾配 30°	
	直接流下	階段状	直接流下	階段状	直接流下	階段状	直接流下	階段状
①	45	31	——	——	測定不可	測定不可	——	——
②	31	15	——	——	測定不可	測定不可	——	——
③	22	14	50	51	0.50	0.30	0.20	0.20
④	15	15	27	31	0.20	0.15	0.25	0.25
⑤	11	15	16	24	1.80	1.40	1.00	1.60
⑥	3	5	9	14	2.70	2.50	2.20	1.20

このように、フロー値の持つ有意性に鑑み、ソイルモルタルの配合要素となる発生土量、加水量、セメント量等をパラメータとして、フロー値に与える影響を整理したものが、図2-69である。このデータには、本節2.6.1で述べたソイルモルタルのひび割れに関する実験で配合された結果も合わせて整理されているが、それぞれのパラメーターとの間に明確な相関関係がみられる。このことは現実の施工において、配合試験の結果をベースにフロー値の調整が、例えば水量の調整によって可能なことを示唆しており、ひいては打設しようとしているソイルモルタルの拡がり範囲や打設高さの管理にきわめて有効であることがわかる。

なお、表2-26に整理された打設ポイント数は、配合によってはベニヤ板斜面の下端から流れ出たケースもあり定量的には言及できないが、斜面が十分広ければ打設高さの逆数的に相関関係が求められるはずであり、フロー値の持つ有意性には変わりがない。

ii) 打設方法による違い

平均打設高さは、軟練り(フロー値が大きい)の場合、直接流下打設と階段状打設との差異はほとんどない。これは、階段状に打設しても、斜面上部からソイルモルタルを流せば、その下部で既に打設されたソイルモルタルを巻き込んで流下させてしまうため、結局直接流下打設と変わらなくなるからである。

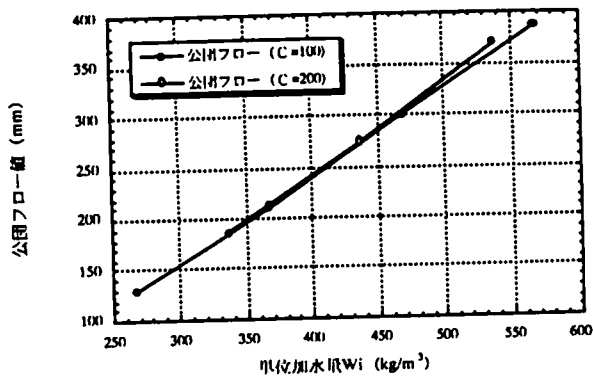
一方、固練り(フロー値が小さい)場合は平均打設高さに変化が見られるが、その変化に規則性は見られない。ただ、階段状打設の方が、直接流下打設に比べ高さのばらつきが大きく(凹凸が多く)、現場施工的には問題がある。

以上のように、いずれの場合も施工的には手間のかかる階段状打設のメリットはなく、直接流下打設の優位性が確認された。

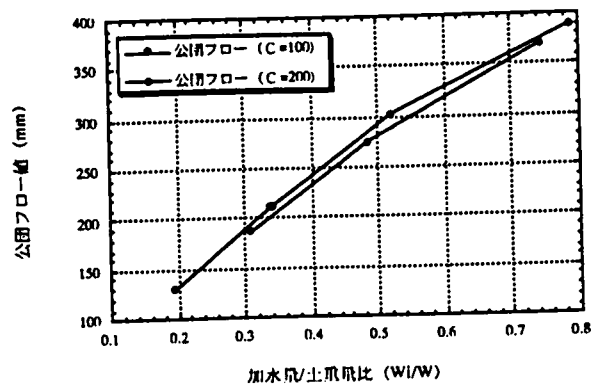
iii) ひび割れ発生状況

前項でも結論を総括したように、ソイルモルタルのひび割れに関する基礎実験結果では、単位セメント量の増加と単位土量の増加が、ひび割れの発生を抑える効果があることが確認されている。今回の実験でも表2-28からも見られるように、単位セメント量、単位土量の減少によって、ひび割れの本数が増加しているのがわかる。その理由として、ソイルモルタルの乾燥は表面から内部へとゆっくり進行するため、収縮の大きさは打設されたソイルセメントの形状によって異なると考えられ、層厚が薄いほど乾燥しやすく、収縮は大きくなりひび割れ本数は多くなる。すなわち、体積－表面積比が小さいほど乾燥収縮が大きいということで、同様の現象が、図2-70に示すようにコンクリートの場合にも確認されている²³⁾。

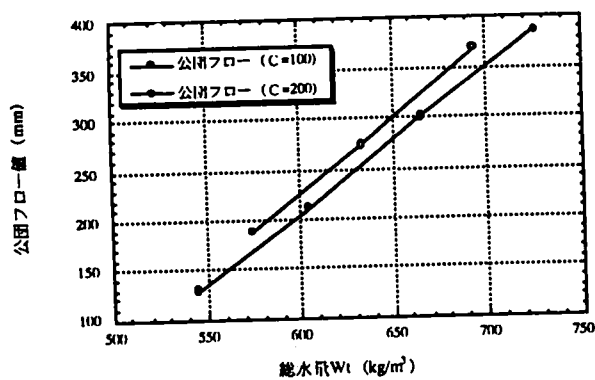
逆に、単位セメント量や単位土量が大きい場合にはフロー値が小さくなり、また、斜面の勾配がゆるい場合にもソイルセメントの流動性が制御され、層厚が大きくなって体積－表面積比が大きくなる。このような場合には乾燥収縮が起こり難く、ひび割れ本数も少なくなる。ただ、この場合ひび割れ幅は大きくなるが、ひび割れそのものが進行性であるため、目に見えて計測できる表面部分のひび割れが顕著であるということであろう。



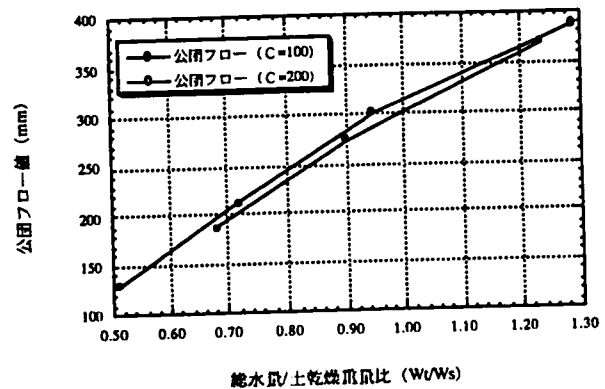
(a) 単位加水量 W_i



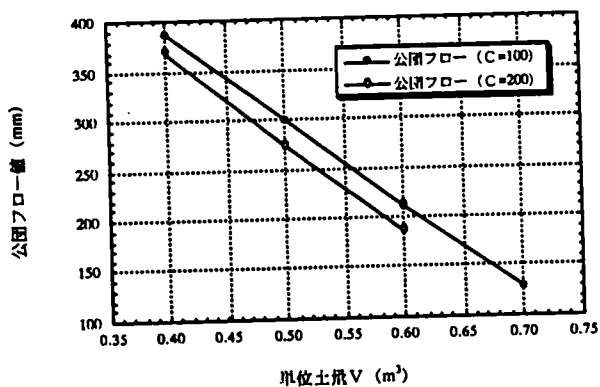
(b) 加水量/土重量比



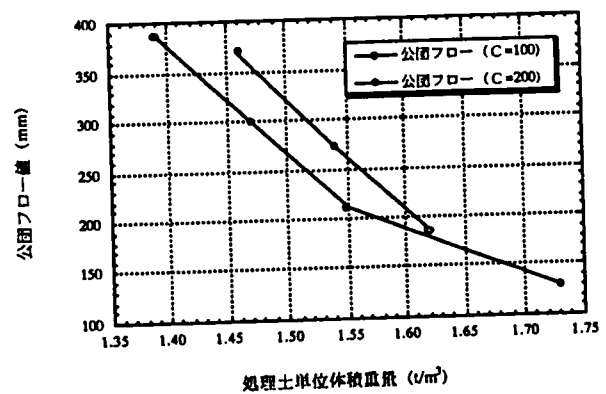
(c) 総水量 W_t



(d) 総水量/土乾燥重量比



(e) 単位土量 V



(f) 処理土単位体積重量

図 2-69 配合条件の各種パラメーターと公団フロー値の関係

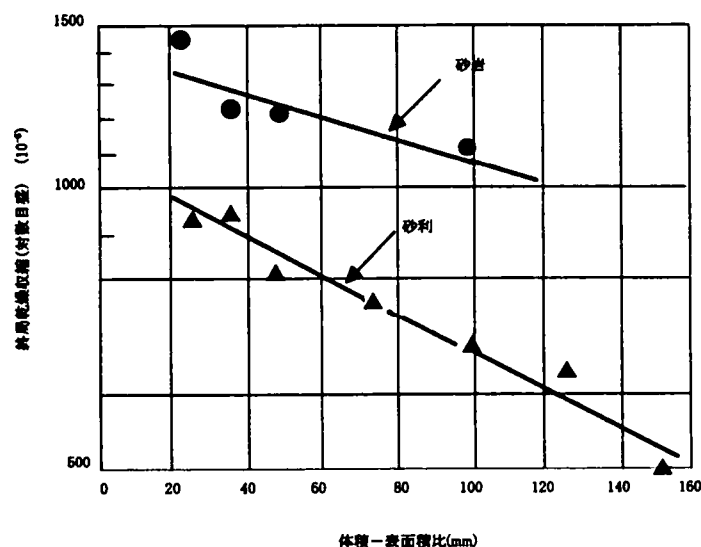


図2-70 コンクリートにおける乾燥収縮と体積-表面積比との関係²³⁾

また、打設方法とひび割れとの間に特筆すべき相関をみることはできなかったが、このことは先述の直接流下による打設方法が妥当であるということを、ひび割れの面からサポートするものといえよう。

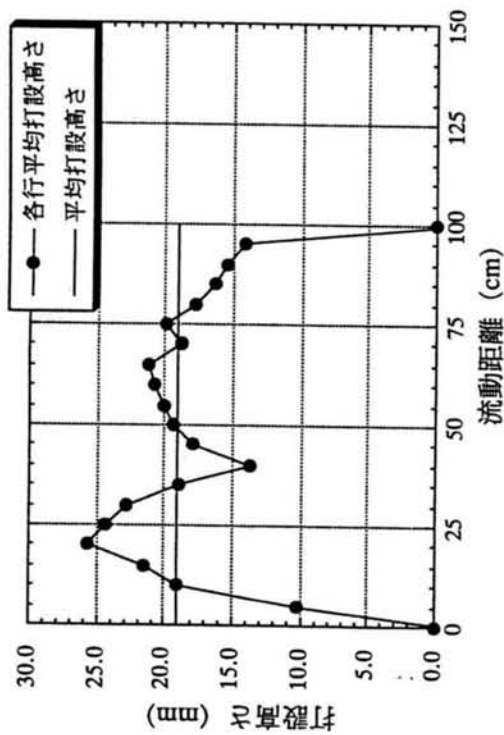
(3) 現場対応への課題

図2-71(1)、(2)に、実験結果のうち、斜面勾配 15 度のケースで配合条件が比較的軟練りの③と、最も硬練りの⑥について、打設状況の総括図を示した。前者は打設高さが 5mm 前後で端部を除いて均一に打設されており、一方、後者は打設高さが大きいものの高さの範囲が $20 \pm 5\text{mm}$ と、見取り図を見ても不陸（凹凸）が明らかである。

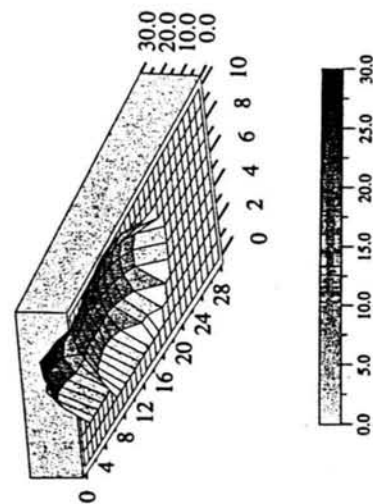
今回の実験は、限られた面積での斜面に、限られた量のソイルモルタルを打設したものであり、実際の現場での規模は比較にならないものとなろう。この場合も、相似律の問題は残るとしても、打設高さや不陸さは配合による流動性（フロー値）によって支配されることには変わりはないと考えられる。ただ、粘土ライナーの指導基準としての最低 50cm の層厚を、1 回の打設でということはいえない。

例えば軟練りの場合、1 回あたり数 cm の薄層を十数回重ねて、所定の遮水性をもつ粘土ライナーを構築することになる。この場合、常に前回の端部が今回の打設のセンターとなるようにして、フレッシュなソイルモルタルで前回の不陸やひび割れを補完しながら、全体として遮水性を確保することが必要である。

また、硬練りの場合、1 回あたり 10cm 前後（硬練り）の打設高さを仮定して数回の打設で所定の遮水層厚が構築可能となるが、実験結果にも見られるようにかなりの不陸を避けることが出来ず、シート敷設前に何らかの補助的な手段が要求されることになろう。



(a) 流下方向の打設高さ変化

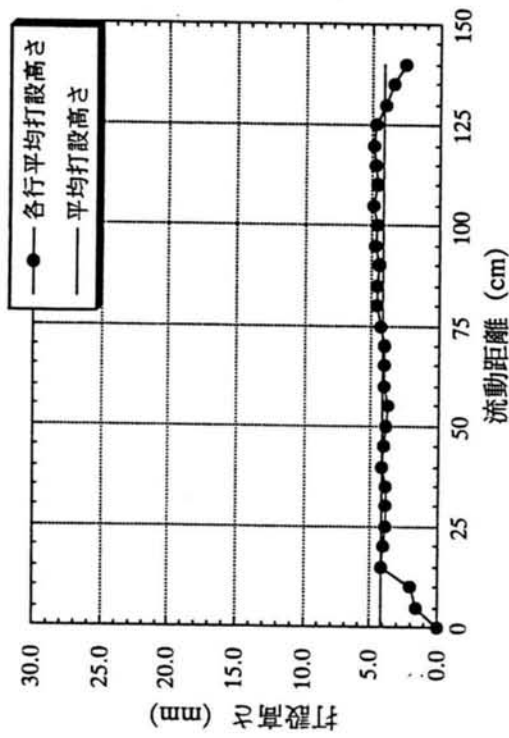


(b) 打設状況見取り図

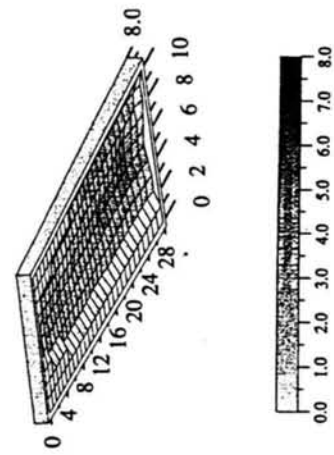
(c) 実験条件

配合条件	③
単位土量	0.6
単位セメント量	200
単位水量	337
打設条件	
打設方法	直接流下
斜面勾配	15°
公団フロー値	189

(1) 軟練りの場合 (配合条件③)



(a) 流下方向の打設高さ変化



(b) 打設状況見取り図

(c) 実験条件

配合条件	⑥
単位土量	0.5
単位セメント量	100
単位水量	468
打設条件	
打設方法	直接流下
斜面勾配	15°
公団フロー値	300

(2) 硬練りの場合 (配合条件⑥)

図2-71 ソイルモルタル斜面打設状況図

2. 6. 3 現場における実験結果

本章2. 2. 4(2)のReSMソイルモルタルによる斜面表層遮水層構築の考え方でも述べたように、考えられる方法として、自然流下、上面型枠、布袋流し込み、ソイルモルタル塊転圧、さらには吹き付け等があげられる。

ここでは、前項までに述べてきた自然流下方式による斜面表層遮水層を中心に、型枠方式および布袋方式について行った現場確認試験結果について触れておきたい。ただ、本現場実験は結果的に失敗であったといえるかも知れないが、その理由は、これまでの基礎実験では斜面延長 1~1.5m に対し数リットルのソイルモルタルを打設したわけであるが、現場実験では約 4m と室内実験と大差ない斜面延長に対し、ReSM用改造ミキサー車を使って立法メートル単位で作成したソイルモルタルを、0.3m³のバックホーバケットで打設しコントロールしようとした点にあった。ただ、現実の採用に当たっての現場確認試験は必須であり、そのプロセスと失敗部分については後日の参考になろうかと考え、ここに取り上げることとした。

(1) 実験概要とその考察

(a) 実験ピットと採用配合

ReSM工法について、廃棄物処分場における遮水工や遮水シートの下地処理材としての適用性を、法面勾配 1 : 1.5 (約 34°) の法面部や底盤部への施工試験により検討するものである。この実験に用いたピットは、図2-72に示すとおりで、周辺地盤は砂質土系のマサ土となっている。このピットの4つの斜面を利用して、①自然流下法、②ソイルモルタル塊転圧工法、③上面型枠工法および④布袋流し込み工法の、4方法による施工性の確認実験を行った。採用した配合は、表2-29に示す標準配合をベースに、土量調整によるいくつかのケースを加えた。

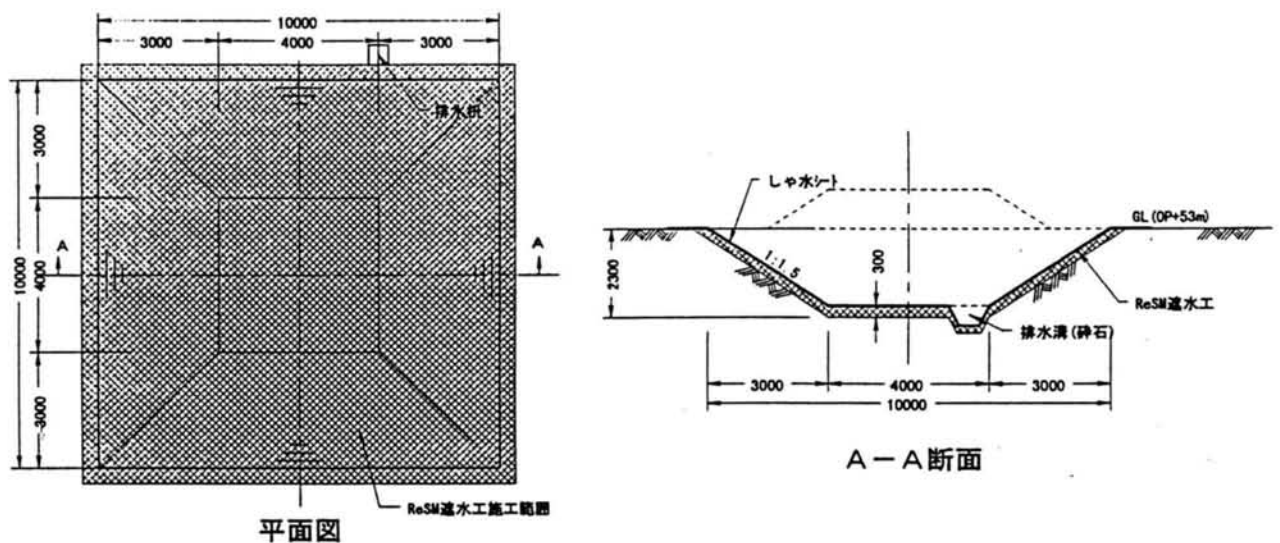


図2-72 ReSM遮水工現場実験平面・断面図

表 2-29 室内試験による標準配合試験結果

材料 単位	セメント kg/m ³	水 ℓ/m ³	土 m ³ /m ³	発生土含水比 (%)	総体積 m ³	単位体積重量 t/m ³
予定地表土	100	336	0.6	15.2	1.0	1.692

注) フロー値が 10 秒以下または 25 秒以上のときは配合再設定

(b) 打設状況

i) 自然流下法

① 流動性の高いケース

高流動の泥水をバックホウのバケットより斜面に流下させた。1 回の流下あたり形成される層厚さは 1~2cm で斜面長が短いため大部分が底部平面に流出する結果となる。このような状態でこの上に 2 回以上泥水を流下させても、既に打設されたソイルモルタルを巻き込んで下部に流されてしまい、全体としての層厚さは数 cm を越えることができなかった。

このことから、この方法は広い面積の斜面を 1 日数 cm ずつ積層するには適しているが、数 10cm を短期間で打設するには課題が多いことが示された。

② 流動性の低いケース

これに対して、土量を多くすることにより流動性を低下させて数 cm~10 数 cm/回の遮水層形成が可能となるが、凹凸が大きくなるため、あとで表面補正が必要となる。また、流動性の低下に伴いミキサー車ドラムからの排出が困難となる現象が見られた。

ii) ソイルモルタル塊転圧工法

さらに流動性を低下させたソイルモルタルを斜面に置いてバックホウのバケットで整形したところ 1 回あたり 10~20cm 程度の層が構築できた。一旦層を形成した後、この上部に同じ配合のソイルモルタルを置いても下盤は流下せず、約 2 回の打設で 20~40cm の層が形成できた。斜面では、このような流動性を低下させたソイルモルタルで遮水層を構築するのも一つの方法と考えられるが、遮水性を維持するためには(振動締め固めなどにより)一定の密度に締め固める必要がある。

また、このようにして流動性を低下させたソイルモルタルを斜面に置いて層形成で一定の層厚さに整形した後、表面部を流動性の高い i) の材料で自然流下させることにより斜面を整形した。その状況を写真 2-6 に示す。

iii) 上面型枠工法

表 2-29 の標準配合ソイルモルタルが、型枠下に h=0.5m 程度充填されると、泥水圧により型枠が浮き上がり周辺より泥水の流出がみられた。このため既に打設した部分の流動性がなくなった時点で増し打ちすることにより、脱型の打ち継ぎ面は生じるものの亀裂はほとんど

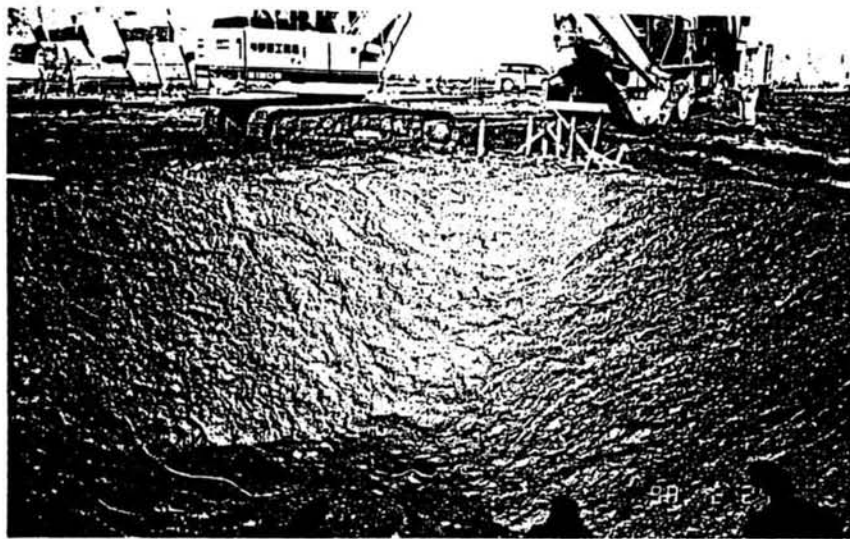


写真 2 - 6 現場実験状況

どなく、表面は滑面状態となる。型枠を用いれば均質な遮水層を構築できることが確認されたが、施工コストを含め効率性に課題を残す。

iv) スパンボンド型枠

やはり同じ標準配合でスパンボンド布袋（直径 10cm、高強度ナイロン素材）内充填を充填したところ、泥水圧によるスパンボンドの網目から泥水流出もほとんどなく、円柱形の袋体を形成できた。円柱体を並列に並べることにより斜水層の成形は可能であろうが、ジョイント部の止水性のためにも布団状等効果的・効率的、経済的な袋体の構造の検討と、輸入も含め材料そのもののコスト低減方法の検討が必要である。

(2) 現場実験からの学ぶこと

(a) 現場実験の課題

本項の冒頭にも述べたように、今回の現場実験では必ずしも十分な成果を上げることが出来なかった。その理由として、実験の要求する質と量に対しピットのスケールが小さすぎたこと、同じくピットスケールに対し使用機械等打設量に関する設備が過大であること、等まず実験計画の不備を上げることが出来る。

また、材料的には配合試験に使用した発生土に比べ砂分が多く、十分な粘性を得られないままソイルモルタルを作成し打設したこともある。このような不適さは、実際の現場でも十分起こりうる事態であることを考えるとき、臨機に対応できるよう製品としての粘土やベントナイトを準備しておく等の配慮が必要であろう。加えて、真冬の 1 月、吹きさらしの小雪舞う野原での実験環境も挙げておかなければならない。

今後の実験に当たっては、とくに自然流下に的を絞り、少なくとも 10m 規模の斜面長を有する箇所を準備する必要がある。

(b) ReSMソイルモルタル工法適用の可能性

以上述べてきたように、ReSMソイルモルタルをとくに斜面部の表面遮水層構築に用いることについては、まだまだ解決すべき課題が多い。ただ、汚泥等産業廃棄物を有効利用して廃棄物処分場を造成することの魅力は棄てがたく、今後とも取り組んでいきたいReSM工法に関連するテーマのひとつである。そのために必要ないくつかの視点は以下の通りである。

- ① 自然流下による薄層のオーバーラッピング打設を基本とする。ただ、勾配や斜面長、基盤の状況等により、ネットや部分的な歯止め等補助的な手段を現場ごとに検討する必要がある。
- ② ReSM工法の特筆すべき点である、発生土現場ごとでのソイルモルタル配合と品質管理が前提である。適正な(公団)フロー値等、処分場建設サイドは品質を購入するという認識が重要となる
- ③ 基本的な施工手順としては、基本的な配合試験等が終わっていることを前提に、
 - a. 設計条件(斜面勾配、斜面長等)や施工条件に適合した標準配合と代替配合の設定
 - b. 現場打設試験による最適(公団)フロー値の決定と代替案の検討
 - c. 複数の発生土現場に配合条件を提示(ソイルモルタルとして購入が前提)
 - d. ひび割れ発生状況等により、オーバーラッピング打設の回数、サイクルタイムなどを選定。
 - e. オーバーラッピング打設は、千鳥に行うことにより重ねあわせによるリスクや不陸の水準化を図る。
 - f. ひび割れの状況により、次のオーバーラッピング前に浸透性の良い止水材料を噴霧し、ひび割れを閉塞するのもひとつの手段である。
- ④ 現況でのReSM工法については改造ミキサー車を使用しているが、廃棄物処分場が山間部等遠隔地にあるため、流通の効率化が重要となる。ソイルモルタルの単位体積重量が 1.5g/cm^3 (生コンは 2.4g/cm^3)であることから、 $7\sim 8\text{m}^3$ /台の専用ミキサー車の開発も課題である。
- ⑤ ユニクロ現象にも見られるように、海外製品としての布製品のコストダウンは著しい。最上層部等状況により併用することによるリスク低減も重要となる。

2.6.4 アルカリ性イオンの周辺地盤への影響

ソイルモルタルはセメント系、あるいは石灰系の固化材が添加されているため、ソイルモルタルが地下水に接する場合、その内部のカルシウムイオンが溶出し、pHの高い地下水が周辺地盤に拡散する可能性がある。

土壌のアルカリ化に関しては、粘性土地盤の場合、本章2.1にも述べた粘土～セメント系における界面化学的特性により、溶出されようとするカルシウムイオンが粘性土の持つイオン吸着能力により吸収され、周辺地盤に影響を与えないことが知られている²⁵⁾。また、ソ

イルモルタルは、透水性が低いいため流動化処理土中を浸透する地下水量は少なく、カルシウムイオンの溶出により pH の高くなるであろう地下水は、流動化処理土表面に接して流れる部分に限られると考えられる。

既存の研究成果でも、ソイルモルタル内部での pH の上昇を除いて、周辺地盤への pH の流出はほとんどないことがいくつかの例をあげて報告されているが²⁶⁾、例えば、図2-73に示したような屋外のテストピットを用いて行ったソイルモルタル埋戻し部周辺のアルカリ化調査試験例がある。試験エリアの中央部を掘削しソイルモルタルを打設し、降雨によるソイルモルタルからのカルシウムイオン溶出が周辺地盤に与える影響を長期にわたって観測している。このときピット周辺は粘性土地盤で降雨によりピットに水がたまる状態となっているが、埋戻し後1年以上にわたり観測が継続された結果、一部ソイルモルタルの表面付近は、8弱のやや高い pH 値を示すものの、他の部分では pH の上昇は全く見られないことが確認されている。

以上のように埋戻し等マス構造の場合には、その周辺地盤への影響は無視できると考えられるが、本節の冒頭にも触れたように、体積～表面積比が小さい表層遮水層構築のような場合には、遮水層表面を伝わる浸透水等がアルカリ化することは十分考えられ、集水機能等設備で対応する必要がある。ただ、産業廃棄物処分場での適用は遮水シートの下地遮水処理層であることや、遮水層下部地盤の地下水が高アルカリ化することは上述の研究成果からも考えにくいことなどから、実用的には対応可能といえよう。

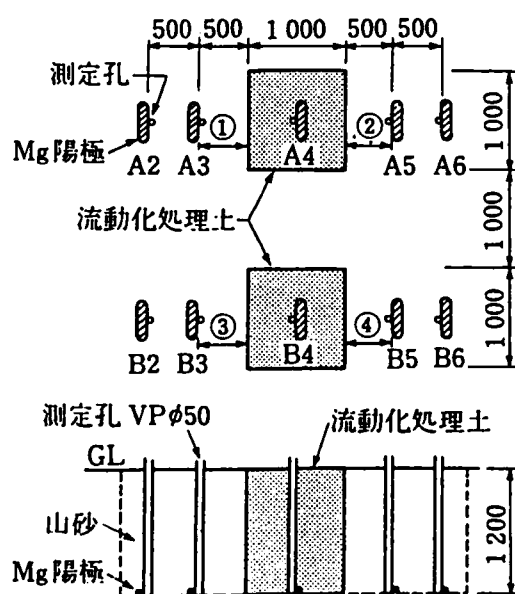


図2-73 テストピットによる試験位置図²⁶⁾

2. 7 気泡軽量混合土による埋戻し工法の研究開発

本論文の研究対象であるソイルモルタルは、地山の土や流動化処理土に比べ含水量が多く単位体積重量が小さいという特徴があるが、気泡を混入させることによりさらなる軽量化を図ろうということである。これまで、含水量が大きいことがソイルモルタルの物性にどのような影響を与えるか検討してきたが、その水の一部が気泡に置き換えられることによる影響について、強度・変形特性といった基本的な問題以外に、水中埋立てやそれに伴う消泡、さらには長期的な安定性といった点での検討が必要となる。

2. 7. 1 実験概要

(1) 試験目的

浚渫土に固化材（セメント）と気泡を混入した気泡混合軽量土（軽量ReSM）の人工島埋立て材としての適用を工学的な見地から検討するにあたっては、表2-30に示す課題を検討しておくことが必要となる。気泡混合軽量土の配合案決定を目的として、ここではこのうち表中アンダーラインの項目に関連して、以下のような検討を行うものである。

表2-30 人工島埋立て材としての気泡混合軽量土の課題

項 目	課 題
材料特性の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>基本配合（強度、密度）の検討</u> ・ <u>水中打設（被圧下養生）による減容率（消泡率）と強度の関係把握</u> ・ 長期安定性（化学的・力学的耐久性）の検討 ・ 浚渫土の違いによる改良特性の把握
材料の確保、ストック方法	大量の浚渫土の確保、ストック方法の検討
施工方法	(1) 輸送システム <ul style="list-style-type: none"> ・ 長距離パイプ圧送システムの稼働性 ・ 材料分離防止装置の効果確認 (2) 気泡混合軽量土の水中打設方法 <ul style="list-style-type: none"> ・ 水中打設管理方法 ・ 変形追従性能を満たす打縦ぎ方法の検討 (3) 混合装置 <ul style="list-style-type: none"> ・ 連続式混合装置への改良、効率化
品質管理方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>連続的管理が可能な「まだ固まらない気泡混合軽量土」の品質管理方法の検討（フロー値およびブリージング等）</u>

① 基本配合（密度・強度）の検討

浚渫土を用いたソイルモルタルに所要の密度と強度を有する軽量土を配合できるかどうかの目安を得るための試験である。気泡混合軽量土は軽くすればするほど軽量土としての有用性は増すが、間隙比が大きくなるため、強度が小さくなることが既にわかっている。

また、軽量土を軽くするほど起泡剤が必要になって高価なものになるため、効果と経済

性を考慮するうえでの基本データになる。

② 水中打設が強度および減容（消泡）に与える検討

特に、軽量土を海水面下で打設する場合の影響、つまり、気泡混合軽量土打設時に軽量土に取り込まれたり、試験体の外部から浸透する海水が強度に及ぼす影響について検討し、また、被圧水条件のもとで生じる消泡率を把握するため、試験室内で海水中に打設した後、被圧海水中に一定期間保管した試験体に対して消泡率の測定と強度試験を実施する。

④ 流動性と分離性

連続的管理が可能な「まだ固まらない気泡混合軽量土」の品質管理方法について検討を行うため、軽量土のフロー値、ブリージング率を測定するものである。

（２）使用浚渫土材料と配合

（ａ）浚渫土の物理特性

使用した浚渫土は神戸沖の海底浚渫土であり、下記の試験を行って得られたその物理特性を表2-31に、力学特性特性としての三軸圧縮試験結果および圧密試験結果を表2-32(a), (b)に、それぞれ示す。

- ・土粒子の密度試験（JSFT-111-1990）
- ・含水比試験（JSFT-121-1990）
- ・粒度試験（沈降試験を含む）（JSFT-131-1990）
- ・液性限界・塑性限界試験（JSFT-141-1990）
- ・一軸圧縮試験（JSFT-511-1990）
- ・圧密試験（JSFT-411-1990）
- ・三軸圧縮試験（UU）（JSFT-521-1990）

これによると実験に使用した浚渫土は粘土分が 50%以上で、シルト分を含めると細粒分が 80%を超える粘性土質であり、強度は小さく変形特性も大きいという、そのままでは再利用が極めて難しい材料である。

（ｂ）浚渫土を用いた気泡混合軽量土の配合試験

浚渫土に固化材（セメント）と気泡を混合した気泡混合軽量土の配合試験において、配合に関わる基本パラメーターとしては、気泡混合軽量土の密度、単位体積あたりの気泡量、セメント量、土粒子量、水量が考えられるが、今回の試験では、この中から軽量土の密度、単位体積あたりの気泡量およびセメント量の 3 量を選択することとした（残りの 2 量である土粒子量と水量は自動的に決定される）。それぞれのパラメーターの設定値は、軽量土の密度が 3 種類（1.1, 1.2, 1.3g/cm³）、単位体積あたりの気泡量（体積比）が 3 種類（10, 15, 20%）、および単位体積あたりのセメント量を 100, 200, 300kg/m³ の 3 種類とした。

表 2-31 浚渫土の物理試験結果

項 目		試験結果
一 般	度粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.616
	自然含水比 w_n (%)	78.2
粒 度	礫 分 2~75mm (%)	1.3
	砂 分 75 μ m~2mm (%)	16.6
	シルト分 5~75 μ m (%)	30.4
	粘土分 5 μ m (%)	51.7
	D ₅₀ (mm)	0.0043
コンシ テンシー 限 界	液性限界 w_L (%)	86.1
	塑性限界 w_P (%)	26.9
	塑性指数 I_P (%)	59.2
分 類	分類名	粘土(高液性限界)
	分類記号	CH

表 2-32 浚渫土の力学試験結果

(a) 三軸試験結果

供試体 条件	含水比 w (%)	57.8	42.8	27.2
	間隙比 e	1.580	1.132	0.714
	飽和度 S_r (%)	95.7	98.9	99.6
項目	粘着力 c (kN/cm ²)	0.024	0.122	0.009
	内部摩擦角 ϕ (度)	2.8	5.8	2.5

(b) 圧密試験結果

供試体 条件	含水比 w (%)	72.1	87.6	107.7
	間隙比 e	1.878	2.274	2.819
	飽和度 S_r (%)	100.4	100.8	99.9
項目	圧縮指数 C_c	0.60	0.80	1.20
	圧密降伏応力 p_c (kN/cm ²)	0.22	0.11	----

この場合、一軸圧縮強さの目標値（最大値）を 1000kN/m²程度としている。なお、それぞれの軽量土に対して、気泡を添加しないで固化した流動化処理土（ReSM）についても試験を行い、軽量土のそれと比較することとする。試験ケースの組合せ一覧表を表2-33に示す。

表 2-33 配合試験ケースの組合せ

ソイルモルタル										
ケース名		I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	I-8	I-9
目標密度(g/m³)		1.1			1.2			1.3		
配合 (1 試中)	土粒子(g)	51.4			213.3	102.8		375.2	264.7	154.2
	全水量(g)	948.6			886.7	897.2		824.8	835.3	845.8
	セメント(g)	100.0			100.0	200.0		100.0	200.0	300.0
	気泡 (g)	0.0(0ml)								
気 泡 軽 量 土										
ケース名		Ⅱ-1	Ⅱ-2	Ⅱ-3	Ⅱ-4	Ⅱ-5	Ⅱ-6	Ⅱ-7	Ⅱ-8	Ⅱ-9
目標密度(g/m³)		1.1			1.2			1.3		
配合 (1 試中)	土粒子(g)	205.2	94.7		367.1	256.6	146.1	529.0	418.4	307.9
	全水量(g)	789.8	800.3		727.9	738.4	748.9	666.0	676.6	687.1
	セメント(g)	100.0	200.0		100.0	200.0	300.0	100.0	200.0	300.0
	気泡 (g)	5.0(100ml)								
気 泡 軽 量 土										
ケース名		Ⅲ-1	Ⅲ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-4	Ⅲ-5	Ⅲ-6			
目標密度(g/m³)		1.1			1.2			1.3		
配合 (1 試中)	土粒子(g)	282.1	171.6	61.1	435.5	327.1	218.7			
	全水量(g)	710.4	720.9	731.4	657.0	665.4	673.8			
	セメント(g)	100.0	200.0	300.0	100.0	200.0	300.0			
	気泡 (g)	7.5(150ml)								
気 泡 軽 量 土										
ケース名		Ⅳ-1	Ⅳ-2	Ⅳ-3						
目標密度(g/m³)		1.1			1.2			1.3		
配合 (1 試中)	土粒子(g)	359.0	248.5	138.0						
	全水量(g)	631.0	641.5	652.0						
	セメント(g)	100.0	200.0	300.0						
	気泡 (g)	10.0(200ml)								

(c) 供試体の作製方法および養生方法

気泡混合軽量土の作製手順を以下に示す。

- ① 浚渫土の含水量も考慮した上で浚渫土に水を添加し、ホパートミキサーを用いて混練して所要の含水比を有する泥土を作製する。
- ② 所定量の普通ポルトランドセメントと気泡をこの泥土に添加してよく混合し、所定の密度を有する軽量土を作製した。起泡剤はアルキルエーテル系界面活性剤（商品名：ファイフォーム 707）を使用し、海水で 25 倍に希釈後、空気 20 倍に発泡させて用いた。
- ③ 作製後の軽量土についてフロー値（シリンダー法）、ブリージング率（ポリエチレン袋方法）および密度（目標密度に対して±0.03 以内を確認）を測定した。

- ④ 試験供試体は軽量土をカラー付きモールド（直径 5cm、高さ 10cm）に注入して作製し、所定の日数（7 日、28 日）だけ 20℃にて海水中で養生した後、モールドから取り出して端面を整形し所定の大きさ（直径 5cm、高さ 10cm）に仕上げた。

2.7.2 実験結果とその考察

(1) フロー値およびブリージング率

気泡混合軽量土のフロー値およびブリージング率の測定結果を図化したものをそれぞれ図2-74および図2-75に示す。この図から読み取れるように、今回用いた原料土（浚渫土）については、目標密度が 1.1, 1.2, 1.3g/cm³ のいずれの場合についても、単位セメント量を 100~300kg/m³、単位体積当たりの気泡量（体積比）を 0~20%の範囲から選択して組み合わせることにより、施工性がほぼ良いとされるフロー値が 15~20cm 程度で、かつブリージング率が数%以内の軽量土を作製できることが確認できた。フロー値とブリージング率のそれぞれに対して、今回配合の基本パラメーターとして選んだ軽量土の密度、単位体積あたりの気泡量およびセメント量が与える影響については、フロー値およびブリージング率とともに軽量土の密度や単位体積あたりの気泡量の増加とともに減少し（負の相関）、単位体積あたりのセメント量の増加とともに増大する（正の相関）傾向が読み取れる。これらの関係は単位体積あたりの土粒子量および水分量の増減と対応させるとよく理解できる。すなわち、軽量土の密度や単位体積あたりの気泡量が増加すると、土粒子量が増加し水分量が減少（含水比低下）して流動性が低い状態になり、逆に、単位体積あたりのセメント量が増加すると、土粒子量が減少し水分量が増加（含水比上昇）して流動性が高い状態になる。

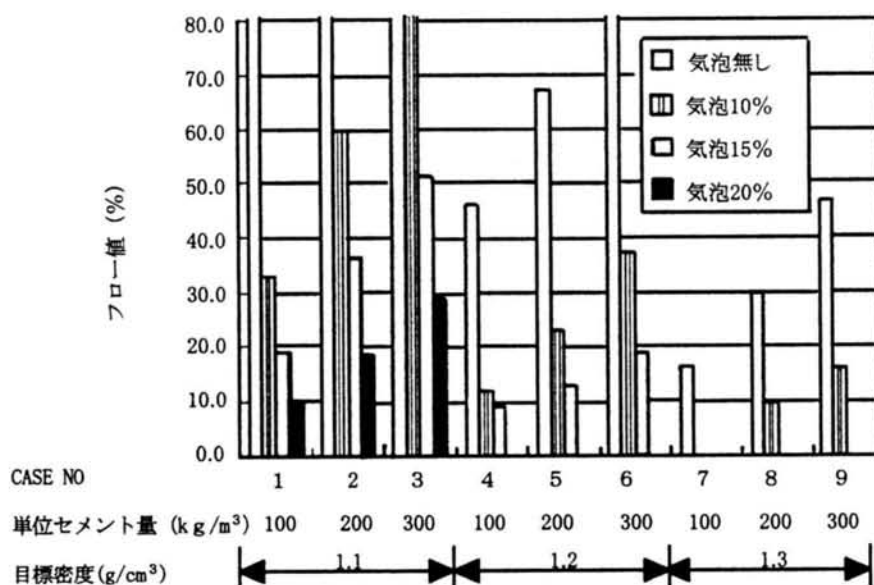


図2-74 フロー値測定結果

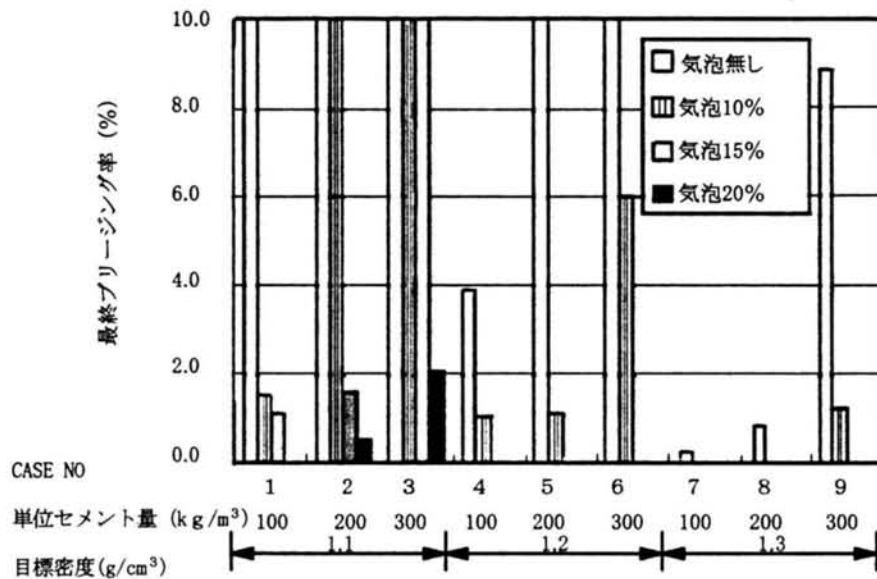
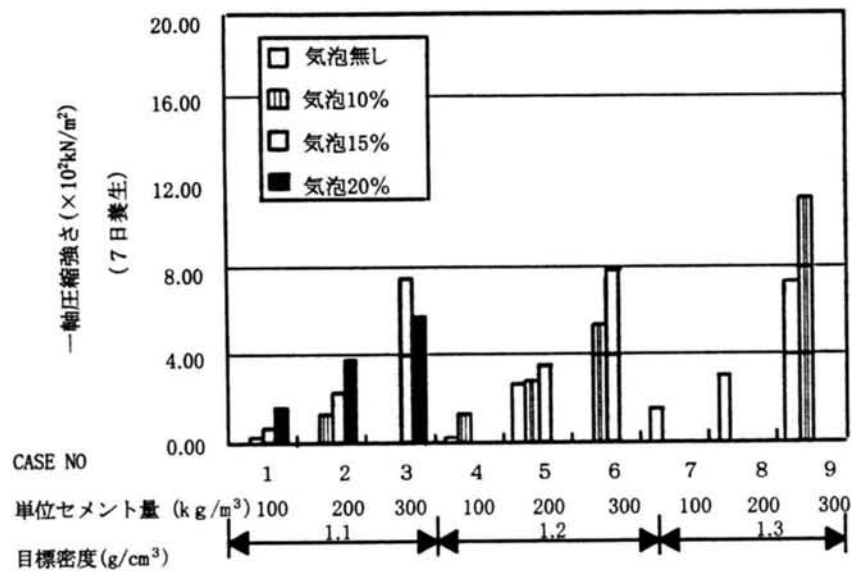


図2-75 プリージング測定結果

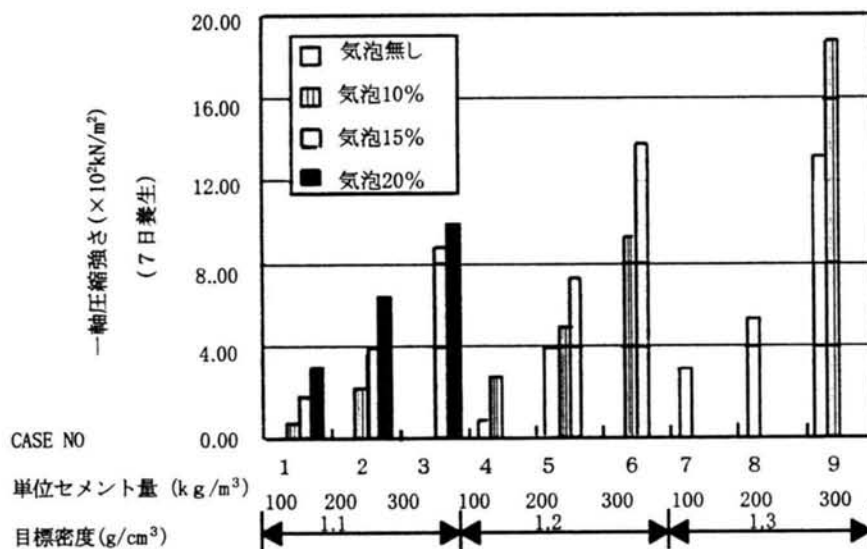
(2) 一軸圧縮強さ

気泡混合軽量土の一軸圧縮強さを各試験ケースと対応させたものを図2-76に示す。この図から読み取れるように、今回用いた原料土については、目標密度が 1.1, 1.2, 1.3g/cm³ のいずれの場合についても、単位セメント量を 100~300kg/m³、単位気泡量を 0~200 kg/m³ の範囲から選択して組み合わせることにより、およそ 1000kN/m² までの一軸圧縮強さ（28 日養生）を有する気泡混合軽量土を作製できることが確認できた。フロー値やプリージング率の測定結果を併せると、気泡混合軽量土は埋立て地盤材料としても幅広く適用できると考えられる。これらの図から、一軸圧縮強さはこれらすべての要因の増加とともに増大する（正の相関）傾向が読み取れる。単位体積あたりのセメント量が増加する場合、前記のように、土粒子量が減少し水分量が増加するという意味では強度に対してマイナス要因となるが、それにも増してセメント量が増加することによる固化作用の効果上昇がプラス要因になって全体としての強度を増大させる結果になっている。

表2-34は、28 日養生供試体の一軸圧縮試験による応力～ひずみ曲線から求めた破壊圧縮ひずみ $\epsilon_{f,28}$ および弾性係数 $E_{50,28}$ （破壊圧縮ひずみの 50%ひずみ時）について、統計処理を行った結果を示している。破壊圧縮ひずみについては、軽量土の密度や単位体積あたりの気泡量の増加とともに増大し（正の相関）、単位体積あたりのセメント量の増加とともに減少する（負の相関）傾向が見られる。また、弾性係数（破壊圧縮ひずみの 50%ひずみ時）は、これらすべての要因の増加とともに増大する（正の相関）傾向が見られる。



(1) 一軸圧縮強さ (7日養生)



(2) 一軸圧縮強さ (28日養生)

図2-76 一軸圧縮試験結果

表2-34 一軸圧縮試験結果の重回帰分析

分析項目		$q_{u28}(100\text{kN/m}^2)$	$\varepsilon_{f28}(\%)$	$E_{50,28}(10^4\text{kN/m}^2)$
重相関係数		0.955	0.546	0.966
偏相関係数	密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	0.815	0.416	0.833
	単位セメント量 $mc(\text{kg/m}^3)$	0.897	-0.515	0.928
	単位気泡量 $vo(\text{l/m}^3)$	0.743	0.418	0.730
推定式係数	A0(定数)	-54.5	-1.655	-5187
	A1(ρ)	41.6	2.641	4080
	A2(mc)	0.040	-0.002	4.41
	A3(vo)	0.038	0.003	3.11

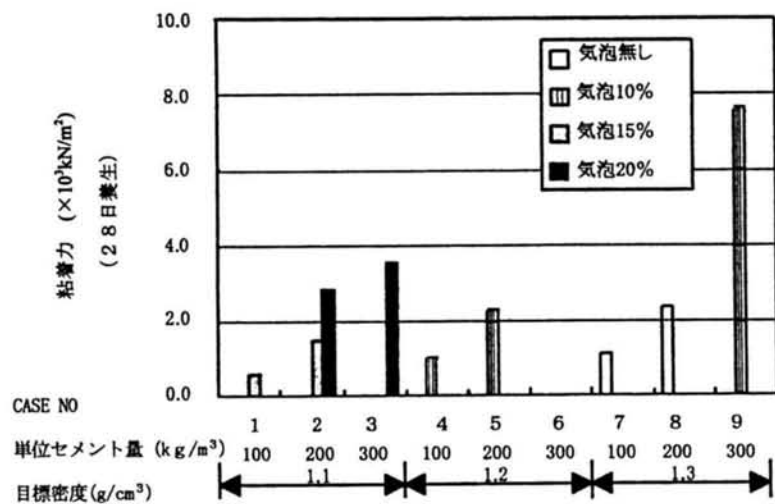
(3) その他の力学試験結果

力学試験は、一軸圧縮試験の他に三軸圧縮試験（UU）および圧密試験を行ったが、そのケースは表2-33の組合せのうち、Ⅰ-7,8、Ⅱ-4,5,9、Ⅲ-1,2 およびⅣ-2,3 の9ケースである。

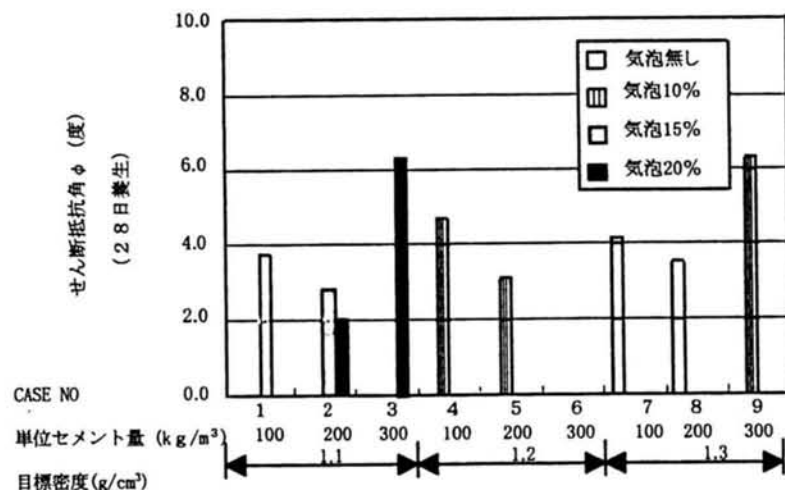
(a) 三軸圧縮試験（UU）

気泡混合軽量土が打設後、海水あるいは埋土による拘束圧を受けることを想定した場合の強度特性を、三軸圧縮試験（UU）を用いて検討したものである。

非圧密非排水条件（側圧条件：100kN/m²、200kN/m²）における主応力差および破壊時軸ひずみの試験結果と一軸圧縮試験結果（側圧：0kN/m²）を用いてモールの応力円と破壊包絡線を描き、粘着力（C）とせん断抵抗角（ ϕ ）を求めた結果を図2-77に示す。



(1) 粘着力（三軸圧縮試験）



(2) せん断抵抗角（三軸圧縮試験）

図2-77 三軸圧縮試験結果

サンプル数が少ないが、特に、粘着力成分と今回配合の基本パラメーターに選んだ 3 つの要因（軽量土の密度、単位体積あたりの気泡量およびセメント量）の間に、強い正の相関を見ることが出来る。

（b）圧密試験

本章 2. 5 にも述べたように、これまでの研究成果から、気泡混合軽量土や流動化処理土はみかけの圧密降伏応力を有し、この降伏応力は一軸圧縮強度とも関係付けられることが知られている。本試験においてもこの特性の確認を行うため標準圧密試験を実施した。

なお、圧密試験用供試体の作成は一軸・三軸圧縮試験とは異なり、濾紙を敷いたカラー付き標準圧密試験容器（直径 6cm、高さ 2cm）に試料を注入し所定の日数（28 日）だけ 20℃にて海水中で養生した後、カラーを取り外して端面を成形し所定の大きさに仕上げた。

圧密試験における $e \sim \log p$ 曲線の一例を図 2-78 に示す。この図の例に示されるように、すべての試験ケースにおいて圧密降伏応力が明瞭に現れた。

圧縮指数と圧密降伏応力を整理した結果をそれぞれ図 2-79(1)、(2) に示す。これによると、圧縮指数は配合の基本パラメーターに選んだすべての要因との間に負の相関性が見出されたが、これは圧縮指数が弾性係数の逆数のディメンジョンを有することを考慮すると理解できる。逆に、圧密降伏応力とこれらの要因の間には強い正の相関が見出せた。

また、圧密降伏応力 p_c と一軸圧縮強度 q_u との関係には、今回実施した試験ケースの平均で $q_u/p_c \approx 0.69$ であり、これは本章 2. 5. 3 で述べた気泡を含まないソイルモルタルにおける $q_u/p_c = 0.717$ に相当するが、ほぼ近い値を示しており同様の傾向があることがわかる。

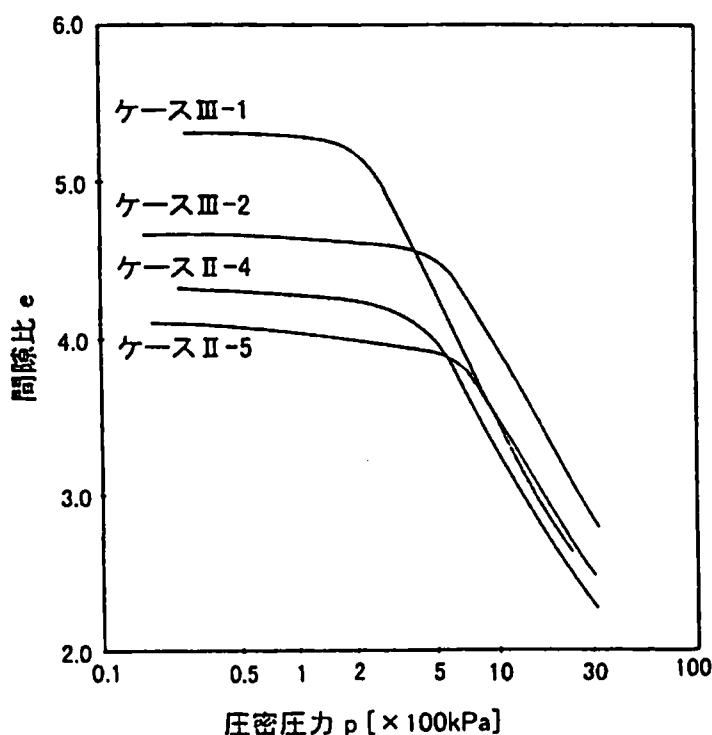
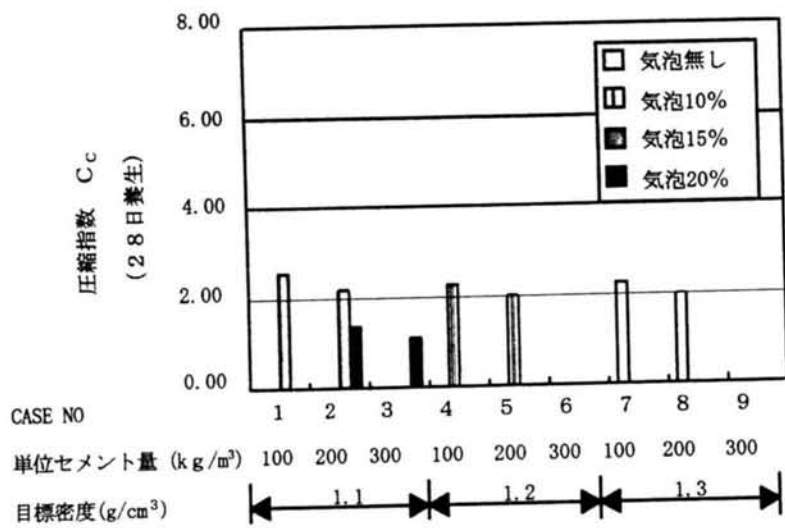
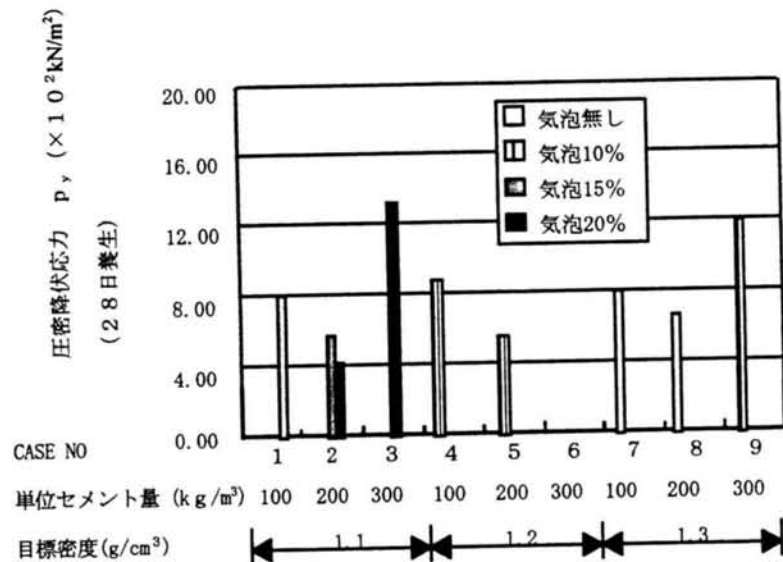


図 2-78 圧密試験における $e \sim \log P$ 曲線の一例



(1) 圧縮指数



(2) 圧密降伏応力

図2-79 圧密試験結果

2.7.3 水中打設の影響

海洋部埋立て工事等に気泡混合軽量土を採用する場合、水中での打設による強度低下や気泡の逸失・減容の問題を避けて通れない。それらがどのような形で現れるのか、試験そのものは種々の誤差が関係して極めて難しいものとなり定量的に評価するまでには至っていないが、興味あるデータが得られているので概観しておきたい。

(1) 供試体の作製方法および養生方法

力学的強度試験と同様、施工性を考慮して選択した試験ケースについて実施する。養生日数は2種類（7日、28日）とし、拘束圧は2種類（0 kN/m²、200 kN/m²）とした。

供試体の作製は、図2-80に示す装置を用いて以下に示す手順で行った。

- ① 予め圧力容器内に海水を張りモールドを沈めておく。
- ② ホパートミキサーを用いて所定の配合に軽量土を作製する。
- ③ トレーミー管を用いて軽量土を打設する。
- ④ 圧力容器を密閉し、コンプレッサーと圧力調整器を用いて圧力容器に所定の圧力を載荷する。
- ⑤ この状態で所定の期間養生した後、圧力容器から試験体を取り出し、配合試験で述べた方法により、モールドを取り外して端面を成形して所定の大きさ（直径5cm、高さ10cm）に仕上げる。

なお、配合の種類は、前項(3)その他の力学試験と同様の9種類である。

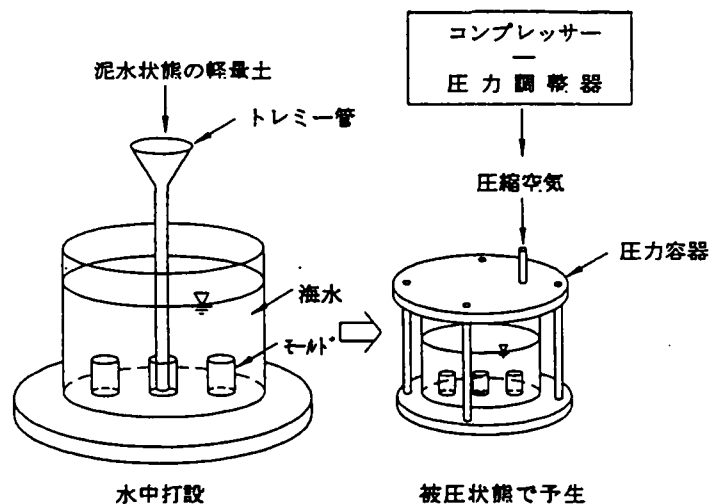


図2-80 水中打設供試体の作成方法

(2) 強度に与える影響

試験室内で海水中に打設した後、被圧海水中に一定期間保管した試験体の一軸圧縮強度を整理した結果を図2-81(1)～(4)に示す。また、これらを気中養生した試験体に対する強度比で整理した結果を図2-82(1)～(4)に示す。これらの図から、養生日数28日までの試験結果から得られる知見を表2-35に整理した。

これによると今回の試験では、強度低下率は試験ケース（試験条件）によって大きく変動し、一定の傾向を見出すことができなかった。これは、軽量土の作製時の諸条件、つまり、軽量土のモールド内への押し出し速度、トレミー管の引き上げ速度、試験体打設から加圧ま

での時間、最初の減圧までの時間（今回の試験では、軽量土を圧力容器内で加圧後、減容率測定のため試験体を1～2日後に最初の減圧を行っているが、この減圧により試験体内部にクラックが発生した可能性がある）などの諸要因が複合して強度に影響を及ぼしたことが原因と考えられる。

ただ、現実の工事でもこれらに類した施工誤差はありうるわけで、場合によっては陸上での施工に比べ50%以下に強度低下する可能性を示唆するものであり、この点は、例えば土田らによる水槽打設実験でも確認されているところである²⁹⁾。

表2-35 水中打設による強度低下

気泡量 (%)	初期密度 (g/cm ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	強度低下率(%) 養生拘束圧 0 kPa	強度低下率(%) 養生拘束 200kPa
0	1.3	100～200	33.2～44.0	36.1～41.8
10	1.2～1.3	100～300	61.0～82.8	63.9～86.0
15	1.1	200～300	33.8～62.5	48.9～61.2
20	1.1	200～300	49.7～73.7	80.5～86.0

(3) 減容率、消泡率

試験室内で海水中に打設した後、被圧海水中（養生拘束 200kPa）に一定期間保管した試験体に対して減容率（または消泡率）を測定した結果を図2-83(1)～(4)に示す。ここでは、減容率、消泡率を以下のように定義した。

減容率＝（打設前試験体容積－打設後試験体容積）／打設前試験体容積（全容積）

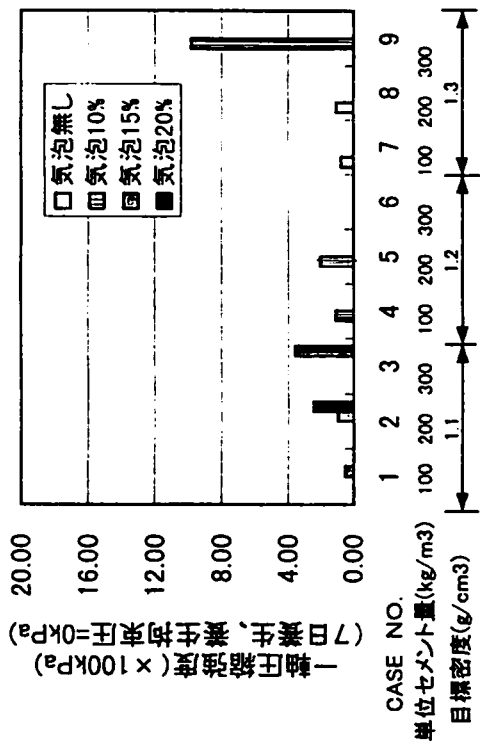
消泡率＝（打設前試験体容積－打設後試験体容積）／打設前試験体容積（気泡容積）

表2-36は試験結果を数値的に整理したものである。これらより、減容率および消泡率は単位体積あたりの気泡量が多いほど大きく、また、これらを密度の増加率でみると、気泡量が前記の10%、15%、20%の試験ケースに対して、それぞれ2.6～3.6%、4.7～6.3%、7.5～9.8%になる。

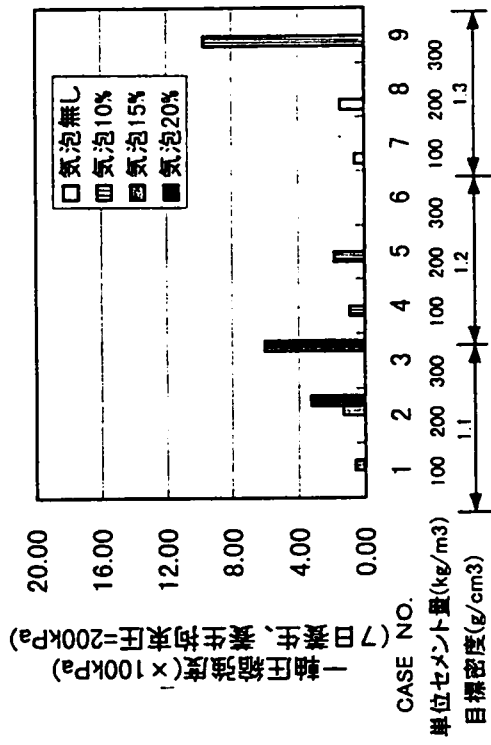
気泡混合軽量土を海水中に打設する場合には、これらの減容率（または消泡率、密度増加率）や強度比を見込んだ配合設計が必要となる。

表2-36 水中打設による減容および消泡

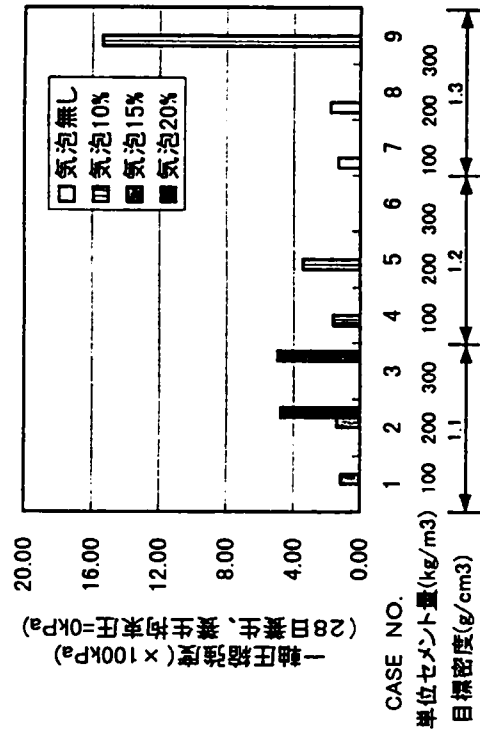
気泡量 (%)	初期密度 (g/cm ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	減容率 (%)	消泡率 (%)
0	1.3	100～200	0.0～2.0	—
10	1.2～1.3	100～300	2.5～3.5	25.0～35.0
15	1.1	200～300	4.6～5.9	30.0～36.7
20	1.1	200～300	7.0～8.9	32.6～42.6



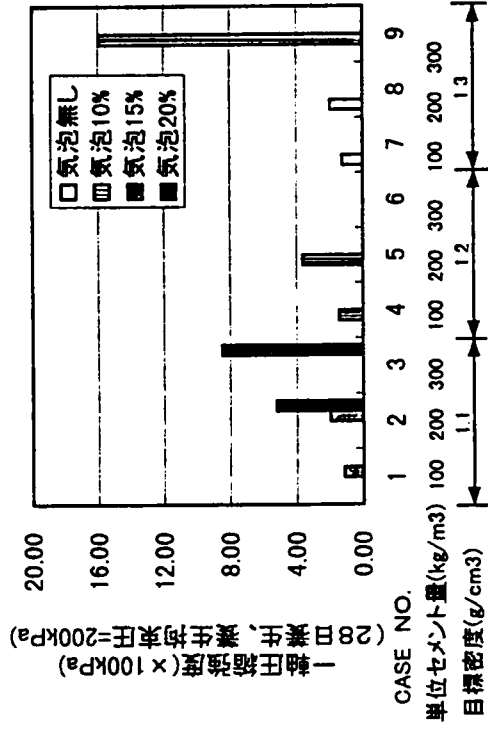
(1) 水中打設後被圧水条件下で養生した気泡混合軽量土の一軸圧縮強度



(2) 水中打設後被圧水条件下で養生した気泡混合軽量土の一軸圧縮強度

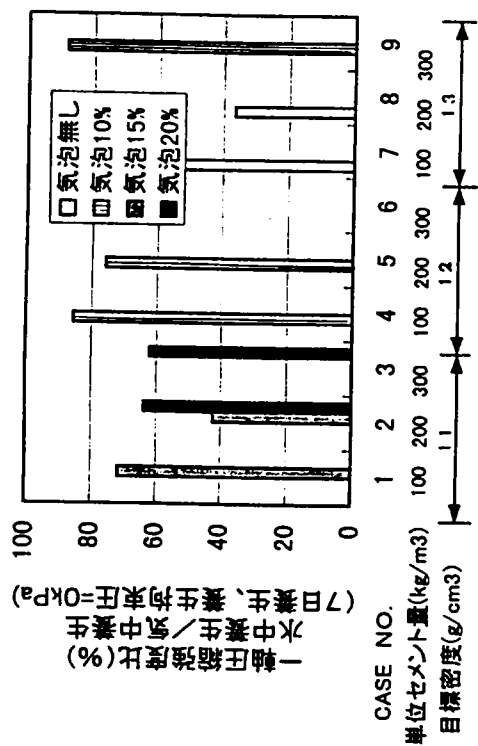


(3) 水中打設後被圧水条件下で養生した気泡混合軽量土の一軸圧縮強度

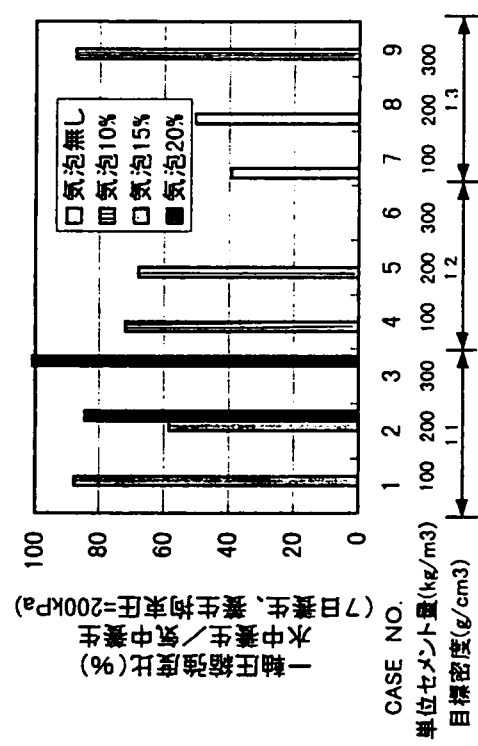


(4) 水中打設後被圧水条件下で養生した気泡混合軽量土の一軸圧縮強度

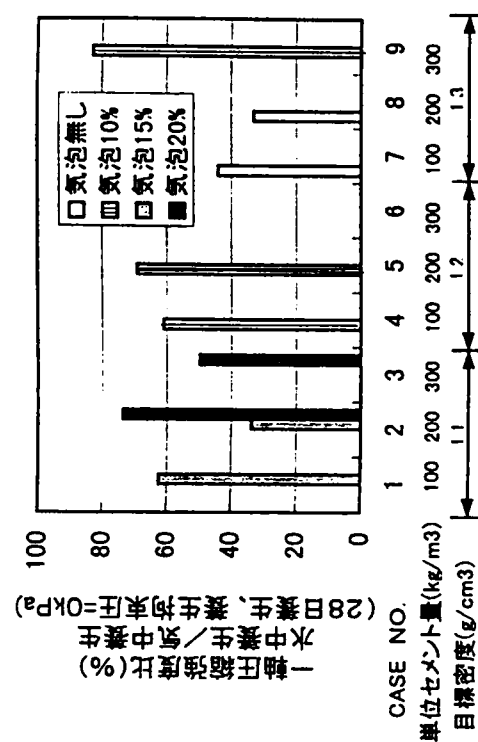
図2-81 水中打設後被圧水条件下で養生した気泡混合軽量土の一軸圧縮強度



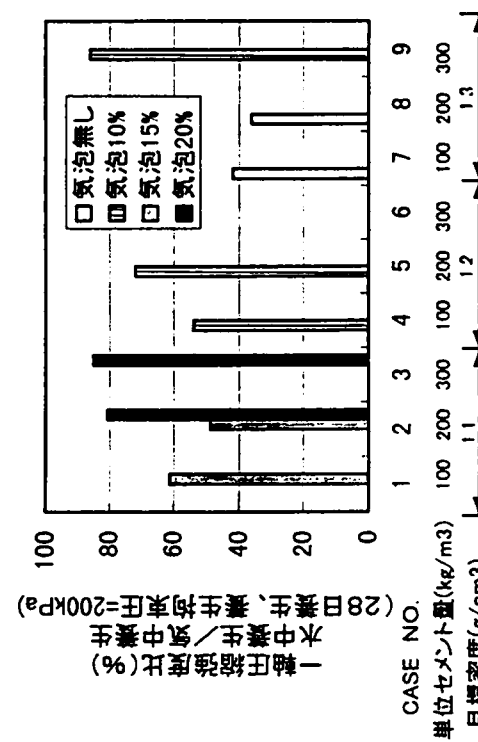
(1) 水中打設後被圧水条件下で養生した気泡混合軽量土の一軸圧縮強度比



(2) 水中打設後被圧水条件下で養生した気泡混合軽量土の一軸圧縮強度比



(3) 水中打設後被圧水条件下で養生した気泡混合軽量土の一軸圧縮強度比



(4) 水中打設後被圧水条件下で養生した気泡混合軽量土の一軸圧縮強度比

図2-82 水中打設後被圧水条件下で養生した気泡混合軽量土の一軸圧縮強度比

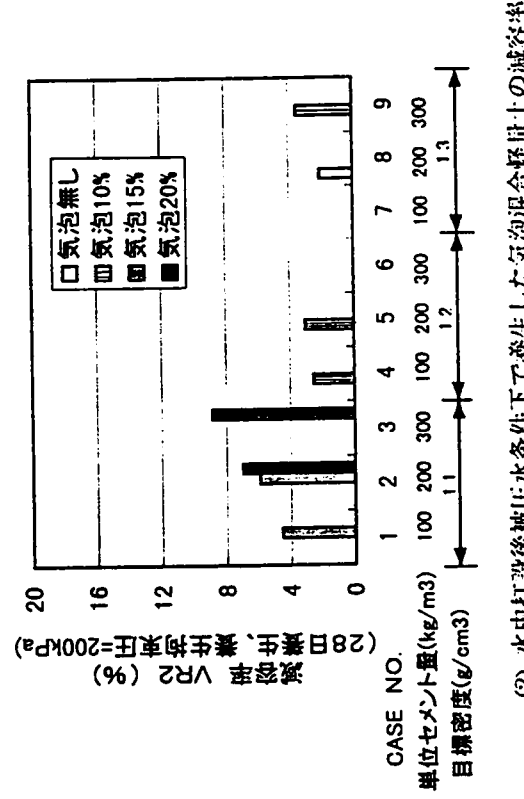
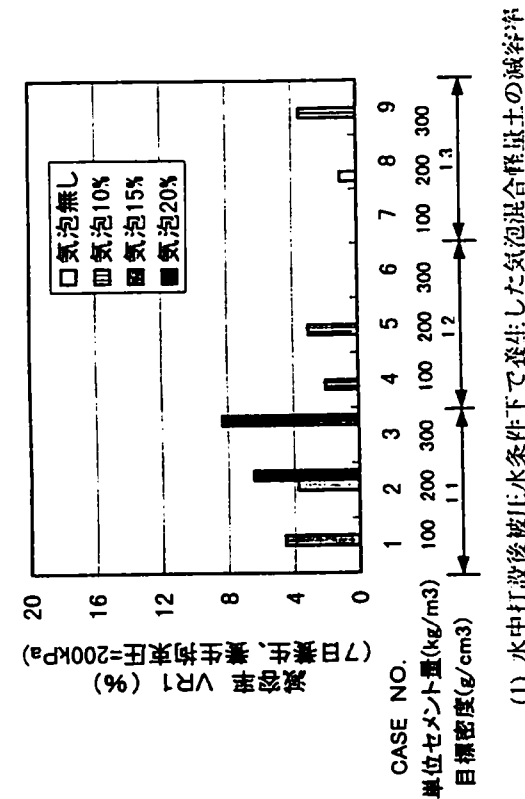
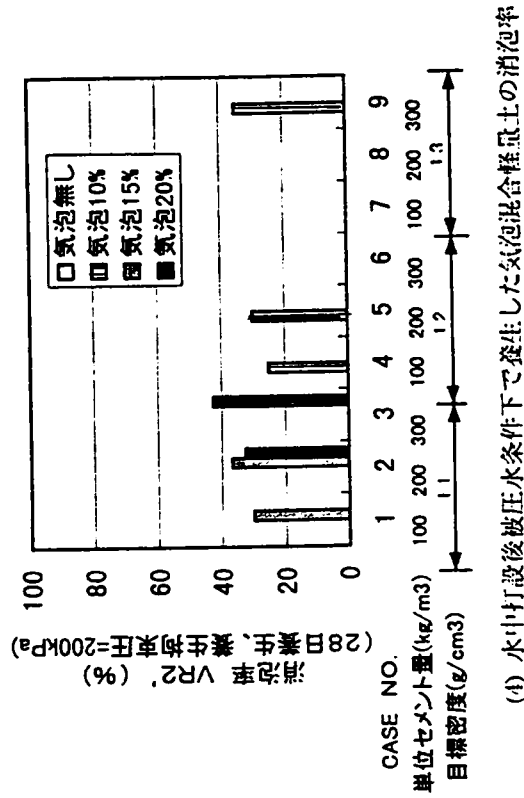
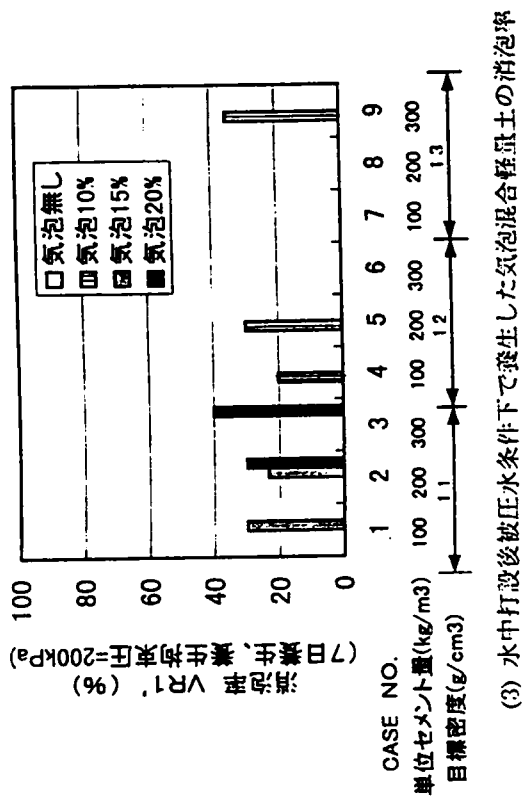


図2-83 水中打設後被圧水条件下で発生した気泡混合軽量土の減容率

2. 7. 4 今後の課題

気泡を用いた軽量土についての研究は、現況では現場での採用を前提としての個別研究の段階であり、系統的な取り組みはこれからの課題である。本節での研究成果についても、そのごく一部にしか過ぎないといえよう。このような観点に立って、ここでは気泡混合軽量土の基本的な考え方を整理して、今後の研究開発の一提言としたい。

本論文の研究対象であるソイルモルタルは、土粒子とセメント（水和反応固化結晶物）とからなる固相と、それらの粒子間に存在する間隙自由水（セメントとの水和反応に供された結晶水を除く）としての液相から成り、間隙空気量としての気相は無視できるものと考えられる。通常の土でいえば飽和土に相当する。

一方、気泡混合軽量土では、ソイルモルタルの液相部に起泡剤を用いて、人工的に気泡という気相部を加えることになる。土という不飽和である。

これらの関係を模式的に示したものが図2-84である。

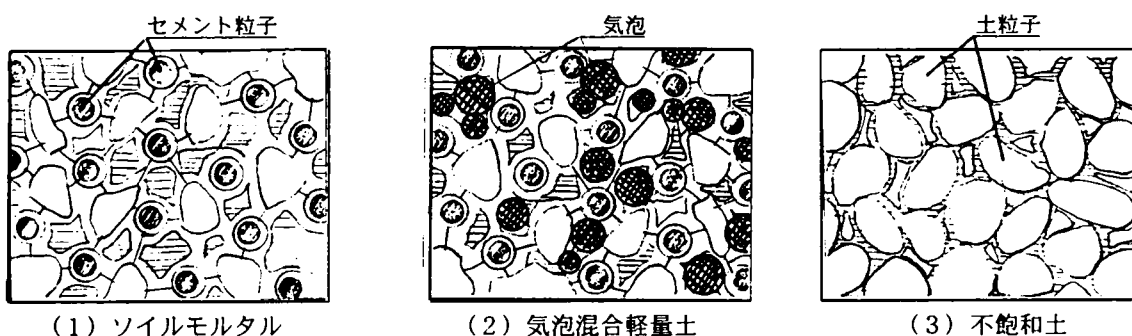


図2-84 気泡混合軽量土とソイルモルタル、不飽和度との関係

気泡混合軽量土の特性を検討する場合、次の2つの要因が考えられる。

- ① ソイルモルタルに気泡が加わることで、相対的に水セメント比や土粒子率が代わることによる因子。
- ② 間隙が大きく、それらが水で満たされるという形で含水量が多いソイルモルタルの特性が、その水の一部が空気に置き換わることによる因子。

この場合、それらの因子に影響を与える間隙水は、当初配合に際し水量（発生土砂中の間隙水を含む）として定量化されるのではなく、ソイルモルタルまたは気泡混合軽量土の固化後その固化反応に要した水量（結晶水）を除いたものとして評価されるべきである。この点が、土の飽和土や不飽和土と視点を異にする点である。以上のような関係を概念図として示したものが、図2-85である。

この図からもわかるように、配合時点での水セメント比は気泡混合軽量土の方が気泡添加体積分だけ小さくなり、強度が増すと考えられるが、セメントを水和反応させる水量は同じであるとする、間隙水に含まれる空気量の大小が強度や流動性どのような影響を与えるの

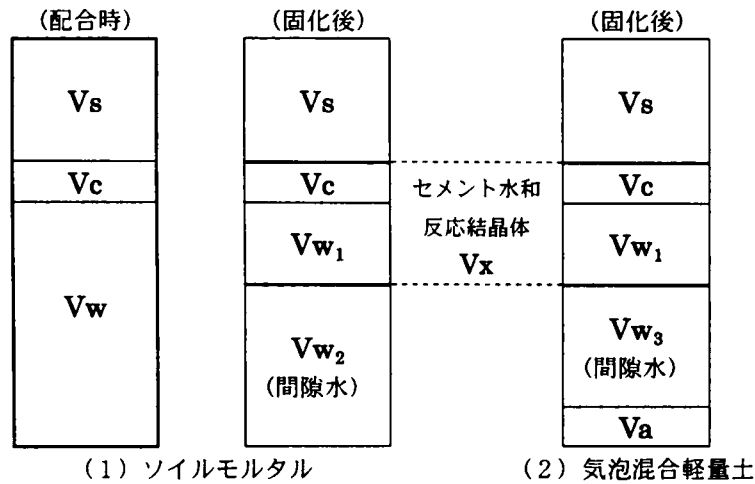


図 2-85 ソイルモルタルおよび気泡混合軽量土の配合概念

か、単に添加空気量のみで単位体積重量を下げるのみの効果しかないのか、今後の系統的な研究が待たれるところである。

今回の実験では、単位体積重量に視点を当てて実験的研究を行ったが、セメント量を一定としたため、気泡量が増える分だけ水量が減り土粒子が増えるという配合になっている。いずれにしても、気泡を多量に含むソイルモルタルでは、配合要因の固化前後の、体積による評価が重要となるようである。

なお、筆者らはパイプライン敷設完了後の周辺埋戻しに関して現場実験工事を行ったが、それに使用したソイルモルタルおよび気泡混合軽量土の気乾養生下の強度試験結果を、図2-86に示した。このうち気泡混合軽量土については、材令と共に強度が低下する傾向がみられる。気中乾燥の経緯の中でソイルモルタルに含まれる気泡がどのような影響を与えているのか、逆に今回の実験で行ったような水中打設の圧力下消泡や減容はどのようなメカニズムで起こり、強度等にどのような影響を与えるのか、関心の大きいところである。

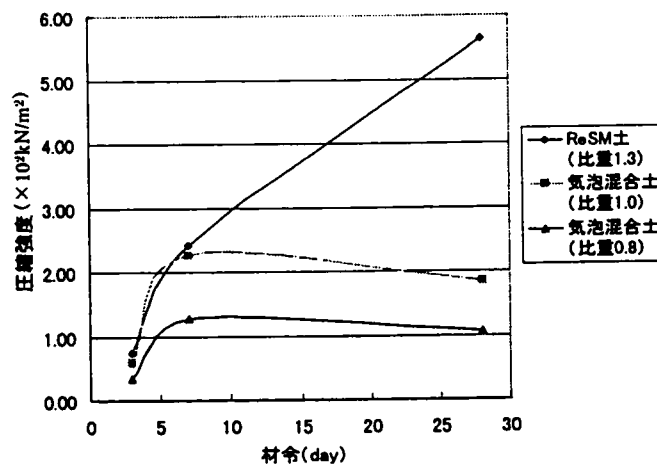


図 2-75 気泡混合軽量土の材令と圧縮強度との関係

2. 8 おわりに

本章では、粘性土をベースにするソイルモルタルの持つ界面電気特性、流動性および密度といった材料特性と現場での適用性との相関に視点を当て、地盤注入、地中連続壁、埋戻し・空洞充填、表面遮水および気泡混合軽量土という5つの分野について、その適用性確認のための材料特性について各種実験を行い、それぞれの分野での実用性を確認した。

これら5つの適用分野における研究成果のうち、室内実験結果を中心に主要な点を以下に整理し、本章の締めくくりとしたい。

(1) 地盤注入工法

粘土注入剤としての要件としては、

- ① ブリージングが少ない
- ② 適当な粘性により注入範囲をコントロール出来る
- ③ 地下水流等により拡散、希釈されない強度を有する

等があげられるが、大阪粘土は2ミクロン以下の粘土鉱物、しかも電気化学的性質の強いモンモリロナイトを多量に含有しており、これらの条件を満たすことが確認された。これをもとに、数多くの室内試験を行った結果、諸要素がホモゲルの強度に及ぼす要因については、水セメント比の減少、ベントナイト比の増加、全体としての水比の減少等が総括的に影響を与えることが知られた。これを注入された状態で評価するために、サンドゲルによる試験を行い、ホモゲル強度が低いものほどサンドゲルとした場合の強度増加が大きく、セメントやベントナイトといった有価物を抑えても効果が見込めることも確認された。

(2) 遮水壁工法

遮水壁構築の方法として、柱列杭方式と連続壁方式の2種類を前提に、とくに後者については置換方式、泥水混合方式および泥水モルタル方式の3方式を開発した。中でも、泥水混合と泥水モルタルの2方式は当時では画期的な方式であり、その後の新しい土留壁構築方式の端緒とも言えよう。

このうち泥水モルタル方式では、自硬性の安定液を使用することになるが、安定液として重要な粘性については、テルナイト等分散剤を併用することにより5～10時間適正な粘性を維持し、掘削安定液としての性能を確保できた。また、強度に与える影響も10時間の使用後についてでも、1/2程度の低下に収まっている。このように、粘土鉱物の持つチキソトロピー効果が有効に発揮された。

(3) 埋戻し・充填工法 (ReSM工法)

(a) 強度特性

粘土モルタル遮水壁の場合と同様、泥水の比重と単位セメント量との関係で任意の弱強度ソイルモルタル作成が可能となることが確認され、とくにセメント量により影響を受けるが、養生期間が長いものほどセメント量の影響が大きく、また、セメント量の少ないものは養生期間の影響も小さい。

(b) 圧密特性

粘性土分を主体とするソイルモルタルは間隙比および含水比が高く、とくに変形（圧密）特性が重要となるが、それに関連する実験結果は以下の通りである。

- ① 供試体は、時間と共に硬化が進むため、短時間で試験が可能な定ひずみ速度圧密試験を採用した。圧密有効応力と間隙比との関係を示す圧縮曲線は、過圧密粘土の関係に類似するが、これは、セメントの水和反応により土の構造骨格が強化され、ある圧力までは圧縮性が小さく、ある圧力を過ぎると構造骨格の破壊が起こり、変形が急に大きくなることを示す。セメント量が多いほど間隙比が小さく、かつ圧密降伏応力も大きくなる
- ② 洪積粘土との比較では、洪積粘土のようにセメンテーション有する粘土は、圧密降伏後繰り返した粘土の圧縮曲線（基準曲線）に近づき平行となるが、ソイルモルタルの場合は、セメントを混合しない廃泥の基準曲線比べ遙かに変形勾配が急で、平行的に漸近する傾向は見られない。ソイルモルタルとセメンテーションを有する自然粘土との圧縮特性は、一見類似しているものの、固結作用の程度とその性質はかなり異なっており、別の手法で取り扱う必要がある。
- ③ 一軸圧縮強度と圧密降伏応力の関係について、今回の試験結果では、 $q_u = 0.717p_{28}$ という関係があり設計では強度が優先することが確認された。ただ、強度がある程度大きくなると、強度が増加しても圧密降伏応力がほとんど増加しないという報告もあり、強度だけで評価すると予想外の変形を伴うこともあり得ることに留意が必要である。
- ④ 養生期間が圧縮特性に与える影響は、セメント量が同一であれば、圧縮曲線は養生日数にほとんど左右されず、養生日数が増加すると降伏応力値も増加するが、強度の増加する比に比べその割合ははるかに小さく、打設後初期段階ではとくに強度特性が優先することが知られた。また、養生期間が短い供試体（例えば1週間）の圧密試験により求めた降伏応力値は、設計における変形特性の評価においては安全側である。

（c）透水特性

圧密試験結果から求めた透水係数は、過圧密領域についてはセメント量に係わらずオーダーとして $1 \times 10^{-3} \text{cm/day}$ ($1 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$) と十分な止水性を有することが確認された。

（4）表層遮水層工法

（a）ひび割れの発生メカニズム

- ① 含水比が高く廃泥利用率が相対的に低い今回のソイルモルタルでは、ひび割れが問題となる。ただ、一般的な埋戻しは大部分が地盤内で、表面のひび割れは起こりにくく、大きな問題になるものではない。一方、表層遮水層等ではその影響は無視できないものとなる。
- ② ひび割れは、プラスチック収縮と乾燥収縮とが係わるが、前者は引っ張り強度に関係するものでありセメント量の影響を受ける。また、後者は含水量に関係するものであり単位骨材量により左右される。
- ③ 容器等の限界もあるが、ソイルモルタルの構成要因がひび割れに与える影響は、セメント量が最も顕著で、単位セメント量が 0kg でひび割れ隙間幅が 5mm 、 250kg で 0.7mm

となっている。プラスチック収縮が優先することの証でもあり、ひび割れを生じさせないための方策としては、セメント量の増加が主で、残土量の増加が従ということになる。

(b) 流動性の確認

- ① 斜面での自然流下現象については、側部を拘束された溝状の斜面を1次元的に流化させて勾配がひび割れに与える影響を見る実験と、いまひとつ斜面を側方にも広がることを認め2次元的に流下させる場合について、材料の流動性（粘性、フロー値）が、勾配の変化と共にその広がりや打設高さにどう影響を与えるかを見るものである。後者については、直接流下打設と階段状打設の2種類行っている。
- ② 例えば、公団フロー値と打設高さとの関係に見るように、斜面に対する打設結果は、当然のことながら、ソイルモルタルの流動性に大きく影響され、きわめて有意な相関性が見られる。このためソイルモルタル流動性がその構成要素である使用土量、加水量、セメント量等によりどう影響されるかが重要となるが、公団式フロー値とそれらのパラメーターとの間には高い相関があり、実用に際しての有意な指標となろう。
- ③ ひび割れについては、ひび割れ本数とひび割れ幅が逆相関の関係にあり、体積～表面積比が重要なパラメーターとなる。その比が小さい場合には、打設高が薄くなり乾燥収縮が卓越して細かいひび割れが多数発生することになるが、逆に体積～表面積比が大きくなると乾燥収縮が起こりにくくなり、ひび割れ本数が少なくなる。ただ後者の場合は、一端起きたひび割れが深部に進行していくため、測定できる表面でのひび割れ幅が相対的に大きくなることが考えられる。

(5) 軽量土埋立て工法

気泡混合軽量土の材料特性に関係する基本パラメーターは、軽量土の密度、単位体積当たりの気泡量およびセメント量（土粒子量および水量はこれらの関数）とすると、

- ① フロー値およびブリージング量は、セメント量とは正の相関、密度と気泡量とは負の相関にある。
- ② 一軸圧縮強度および三軸圧縮試験（UU）による粘着力成分は、3つの基本パラメーターの全てと正の相関にある。
- ③ 圧密試験結果においても、2章のソイルモルタルと同様明確な圧密降伏応力が見られる。その値は3つの要因とは正の相関であり、逆に圧縮指数は負の相関となる。

一方、水中打設（水圧下での養生）が強度に与える影響は、試験上の不確定要素もあって、明確な相関を得ることができなかったが、強度が1/2以下に低下する可能性も十分にあり得ることが示唆された。また、減容については含まれる気泡容積の1/3相当分が体積減少となって現れ、これが全て消泡と仮定すると、気泡部分の容積が2/3に減少したことになる。いずれにしても、気泡混合軽量土を水中打設する場合には、大規模な現場実験を行って、その挙動を確認した上で設計する必要がある。

【 第 2 章 参考文献 】

- 1) 日本粘土学会編：粘土ハンドブック，技報堂，pp94～137，1966 年
- 2) 山口柏樹：土質力学，技報堂，p28，1969 年
- 3) 岩田元垣：深層砂礫層へのグラウト注入材としての粘土，発電水力，No.97，pp6～10，1968 年 11 月
- 4) 岩田元垣：注入材としての粘性土の利用について，土木学会論文報告集，第 195 号 pp89～99，1971 年 11 月
- 5) 岩田元垣，今藤健征：火山灰質粘土を用いた注入材料の物質化学的性質の研究，土質工学会論文報告集，Vol.12，No. 2，pp76～86，1972 年 6 月
- 6) 岩田元垣，東出昇，今藤健征：火山灰質粘土を用いたグラウチングの特性および実施例，土質工学会論文報告集，Vol.14，No. 3，pp91～100，1974 年 9 月
- 7) Ernest Ischy, Rudolph Glossop : An Introduction to alluvial grouting, Institute of Civil Engineers, Vol.23, No.6598, pp705～725, 1962.12
- 8) Taher A bu Wafa, Azig H.LABIB : The Great Grout Curtain under the High Aswan Dam, Commission International des Grands Barrages, Istamboul, pp275～302, 1967
- 9) Taher A bu Wafa : Field Tests for Grouting Nile Alluvials under the Aswan High Dam, Commission International des Grands Barrages, Rome, pp191～244, 1961
- 10) 熊谷組パンフレット：ReSM工法（建設発生土の高流動化処理による埋戻し工法），1997 年
- 11) ReSM工法研究会パンフレット：ReSM工法（建設発生土を利用した締め固め不要の人工地盤構築工法），1998 年
- 12) 堀家茂一，有岡正樹，富永克己：大阪粘土を用いた注入材に関する実験的研究（Ⅰ），熊谷技報第 16 号，pp99～115，1975 年 12 月
- 13) 日本建築学会近畿支部 土質工学会関西支部：大阪地盤図，コロナ社，1966 年
- 14) 箭本実，有岡正樹，堀家茂一：粘土モルタル遮水工法の技術開発と施工例，熊谷組技報 No.20，pp83～102，1977 年 12 月
- 15) 有岡正樹：滞水砂礫シールドにおける粘土モルタル遮水壁の施工と応用，日本プロジェクトリサーチ講習会テキスト，1976 年 5 月
- 16) 藤原東雄，上俊二，福田靖，竹内潤，山本勝英，柳原勝也：セメント系固化材により安定処理されたカオリン粘土の力学的性質(1)，第 31 回地盤工学会研究会，pp169～170，1996 年
- 17) 坂上敏彦，中川八十臣，道広利一：混合土の圧縮特性に関する基礎的研究，土木学会第 50 回年次学術講演会，pp260～261，1995 年

- 18) 建設省土木研究所：流動化処理土利用技術マニュアル，p10，1997 年 12 月
- 19) 土質工学会基準（JSF 412-1992）：土の定ひずみ速度圧密試験方法，土と基礎，Vol.40，No.8，pp50～55，1992 年
- 20) 柴田徹，西原晃：練り返し再構成粘土の圧密基準曲線，第 32 回地盤工学研究発表会概要集，pp389～390，1997 年
- 21) 柴田徹，松井恒治：Aging を受けた粘土の圧密特性，第 29 回地盤工学研究発表会概要集，pp303～304，1994 年
- 22) 岩崎訓明，西林新蔵，青柳征夫：土木学会偏 新体系土木工学，フレッシュコンクリート・硬化コンクリート，1981 年
- 23) 岡田清，明石外世樹，小柳治共編：新編 土木材料学，国民科学社，1995 年
- 24) 瀬津家久：水理学・流体力学，朝倉書店，1995 年
- 25) 澤孝平，友久誠司，後藤年芳：地盤改良が環境に及ぼす影響と対策，材料 Vol.19，No.9，pp1058～1062，2000 年 9 月
- 26) 久野悟郎編著；土の流動化処理工法，技法堂出版，p63，1997 年 5 月
- 27) 土田孝，松下弘志，吉原正弘，輪湖建雄：水中打設時における気泡混合処理土の材料分離抵抗性の評価，土木学会論文集，No.644／VI-46，pp1～12，2000 年 3 月

第3章 ソイルモルタル高度利用化工法の現場適用事例

3.1 はじめに

本章では、第2章で述べた様々な分野におけるソイルモルタルの高度利用に関する材料特性を中心とした研究開発成果の現場適用事例として、5つの適用分野のうち、現場での大規模な粘土注入実験、粘土モルタル遮水壁に関する現場実証実験および滞水砂礫層シールド遮水壁や開削工法での土留壁適用事例、さらにはReSM工法による地下鉄開削工事における広域的な埋戻し事例等について詳述するものである。以下にその概要を紹介しておきたい。

(1) 現場実験にみる粘土注入適用事例

室内実験の結果、大阪粘土は微粒分が多く界面化学的な特性も活発で、とくに止水を目的とした粘土注入の材料として適したものであるという結論を受けて、大阪市交通局地下鉄2号線(16工区)工事におけるシールドセグメント等材料投入用の堅坑部(内寸法19.100m×5.000m)を利用して実施した、2回の現場注入実験結果を中心に述べている。対象地盤は、中間にシルト層を挟んで上下に2層の滞水層を有しており、第1滞水層は細砂～中砂、第2滞水層は礫混じり粗砂で、いずれも 10^{-1}cm/sec オーダーの透水係数を有する地下水の豊富な層である。

2回の実験のうち、第1次現場実験の結果、粘土注入の効果について特に背面止水や透気試験、注水試験において他の市販の薬液と大きく劣ることはないものの、掘削に伴う目視確認では砂層内への顕著な浸透注入を確認することができなかったことを受けて、特に①粘土の種類と②ゲルタイムとについて室内実験等再検討を行い、第2次現場注入実験を実施した。その結果、注入状況の確認および透水試験結果も良好で、粘土注入は有効で安価な地盤改良工法として注目されるべき工法であるとの結論を得た。

(2) 地下鉄工事他における粘土モルタル遮水壁工法

種々の室内実験結果により、大阪粘土が遮水壁材料として十分使用できる見通しが得られたので、上述の注入実験に使用した堅坑掘削工事のためのH-横矢板工法による土留遮水壁として実験用に採用した。実験の種類は、室内実験でその適用性を確認した、粘土モルタルPIP(Pile in Place)工法および3種類の粘土モルタル連続壁工法(置換方式、混合方式、泥水モルタル方式)で、いずれも良好な結果を得ている。

粘土注入および粘土モルタル遮水壁の研究開発は、地下鉄シールド工事の滞水砂礫層対策に関連して進められてきたが、対象となった大阪地下鉄2号線では総合的な判断の結果後者の粘土モルタル遮水壁をシールド補助工法として採用することになった。実績としては、粘土モルタルPIP遮水壁を中心に作成した粘土モルタル約6,600 m^3 、粉碎した粘土は

約 1,500t（粘土塊にして約 1,000m³）に及んでおり、遮水効果のほか圧気効果、地盤沈下に対する効果など大きな成果を得た。

本節においては、以上のような現場展開の詳細について詳述するとともに、その後本粘土モルタル工法を採用した 7 件の施工実績のうち、ポンプ室工事や地下鉄開削部工事での適用例についても紹介している。

（３）ReSM工法による埋戻し・空洞充填の施工

大阪地下鉄7号線大正延伸工区での土圧シールド掘削土は、メタンガス対策として発生土を坑内で大気に曝すことを避けるため塑性流動化状態で配管内をポンプ圧送して排出した。この含水比の高い発生土の有効利用の試みとして、地下鉄駅舎部開削工事での狭隘な閉所空間における山砂の埋戻し・振動締固めなどを不要とすることによる安全性の向上や、沈下量の少ない均質な人工地盤の効率的な構築を目的に、前章でのべたReSM工法により約 20,000m³を超える埋戻しを行った。本工事への適用の特徴は、シールド土砂発生工区 4 工区、埋戻し適用工区 6 工区という、自ら利用を超えて広域的な再利用を行った点にある。

また技術的にも、加水量（W）やセメント量（C）、土量（S）等とソイルモルタルの物理、力学特性との相関を逐次管理し、累積値管理（[打設量]の累積値と[打設量]×[一軸圧縮強さの累積値]）という新しい管理方式に結びつけ成果を得ている。実際の施工面でも、狭隘な地下空間におけるすぐれた施工性や、側部埋戻しに伴う支保工撤去の際の土留壁変形の抑制等、大きな成果に結びつけることが出来た。

一方、ReSM工法によるトンネル空洞充填工事としては、上記の大阪地下鉄工事での施工の成果が大規模に適用されたその後の事例として、琵琶湖から京都市内へ導水する琵琶湖第二疏水トンネル（本坑延長 4,056m）の完成に伴い、その作業坑、水平坑および斜坑の埋戻し工法として採用されたReSM工法の成果を紹介している。構造的に、斜坑は水平距離 500m で入口部と 100m の高低差をもつ約 12 度の勾配をもち、作業坑、水平坑へと繋がっているが、その距離と高低差を克服し、沈下による空隙や頂部までの完全充填が難しいことなどから、作業坑および水平坑頂部には気泡混合軽量ReSM工法を採用している。埋戻し総数量は約 15,000m³に及んでいる。

3. 2 現場実験にみる粘土注入適用事例¹⁾

前章で述べた室内実験の結果大阪粘土は微粒分が多く界面化学的な特性も活発で、粘土注入の材料として適したものであるという結論を得た。しかし実際の地盤に注入された場合の効果については全く未知数であり、注入工法の成否が注入材の特性と被注入地盤の土質工学的な問題であることを考えるならば、現場における試験注入のもつ重要性は大きい。

ここでは、大阪市交通局地下鉄2号線(16工区)工事におけるシールドセグメント等材料投入用の堅坑部を利用して実施した、2回の現場注入実験結果を中心に述べることにする。

3. 2. 1 注入対象地盤

2回の現場実験に供した将来掘削する堅坑部の平面図を図3-1に、その断面および土質状況は図3-2に示した。図にも示すように、平面的には内寸法19.100m×5.000mの堅坑を、次節で述べる粘土モルタル遮水壁のための現場実験用も含め3つに分割した。

対象地盤は、中間にシルト層を挟んで上下に2層の滞水層を有しており、第1滞水層は細砂～中砂、第2滞水層は礫混じり粗砂となっている。すでに行われた揚水試験の結果から、これらの滞水層はいずれも 10^{-1} cm/secオーダーの透水係数を有する地下水の豊富な層であることが知られている。また実験地点における両層の平均的な粒度分布は図3-3に示す通りである。

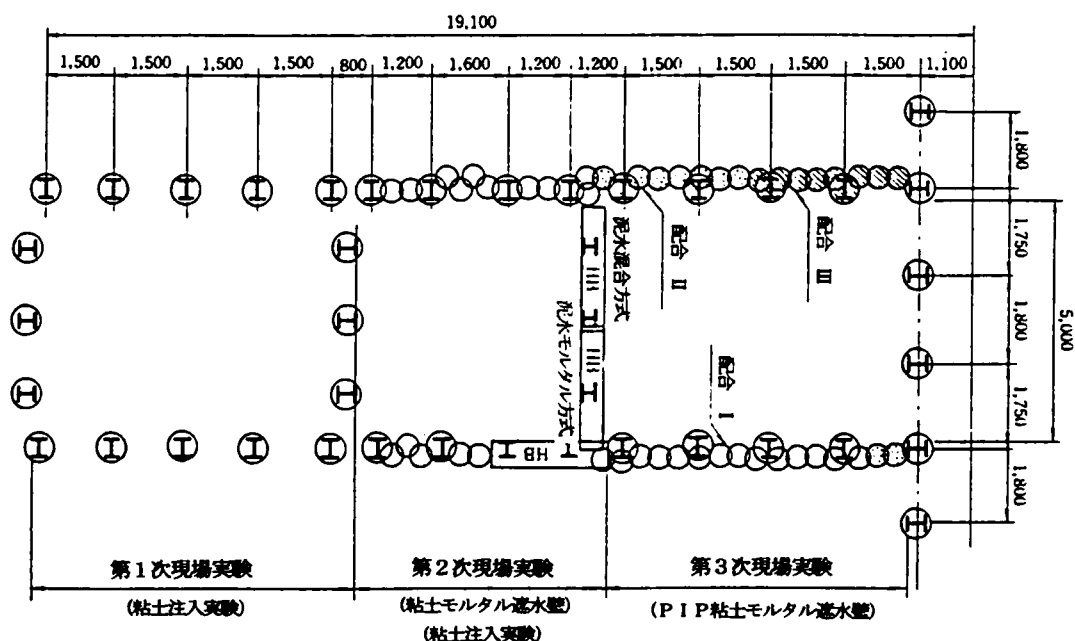


図3-1 現場実験堅坑平面図 (単位: mm)

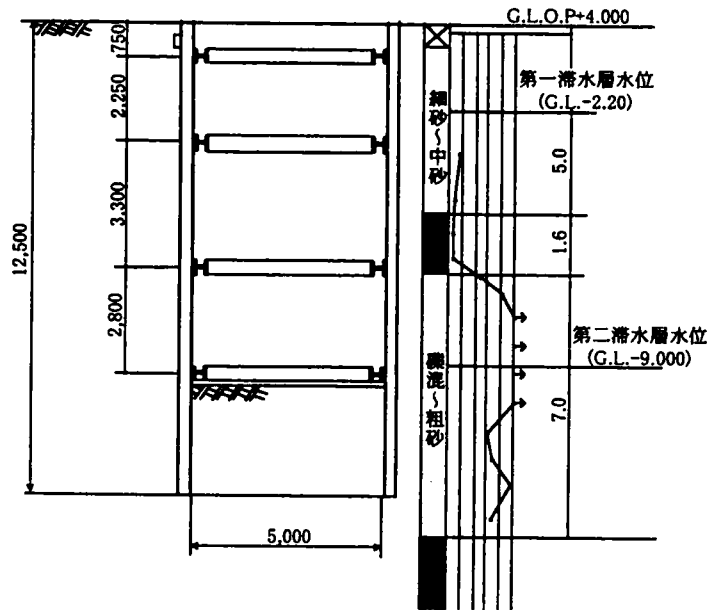


図 3 - 2 縦坑断面及び土質断面図

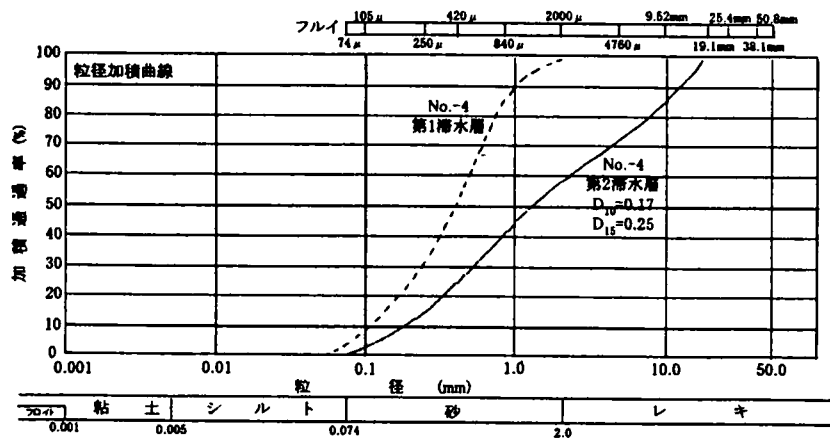


図 3 - 3 注入対象層の粒度分布

3. 2. 2 第 1 次現場注入実験

(1) 実験概要

第 1 次現場注入実験の全体計画図を図 3-4 に示すが、その目的は次の通りである。

- ① 粘土注入の H 横矢板工法における背面止水効果
(水ガラス系 LW 注入材および尿素系注入材との比較)
- ② 粘土注入の浸透状況の確認 (水ガラス系 LW 注入材との比較)
- ③ 注入方式による施工性と注入効果の比較

④ 粘土注入による透水性、透気性に対しての改良効果（水ガラス系注入材との比較）

現場実験に供する粘土は室内実験と同一のものをすることが好ましいが、時期と数量の問題で粘土が多量に残土として搬出される現場は限られてくる。いくつかの粘土搬出現場の粘土について粒度分析、配合試験を行い今回の現場試験には築港の沖積粘土を使用することにした。図3-5はその築港粘土および室内実験に用いた大宮粘土、後述の第2次現場実験に使用した武庫川粘土の粒度分析結果を示しているが、大宮粘土に比べ微粒分がやや少なく最大粒径も大きい。このことは図3-6に示したフロー試験結果の一例にもみられるように、同一配合でも粘性がいく分小さくなっている傾向と一致している。また表3-1はベントナイト比 0、セメント比 0.3 の場合で、粘土・セメント・ベントナイトなどの固体に対する水の重量比である水比を変化させた場合の1週強度を、大宮粘土による室内実験との比較で示したものであるが、これによると築港粘土の場合強度がかなり大きく、使用粘土の違いにより特性がある程度変化することがあるので注意を要するところである。

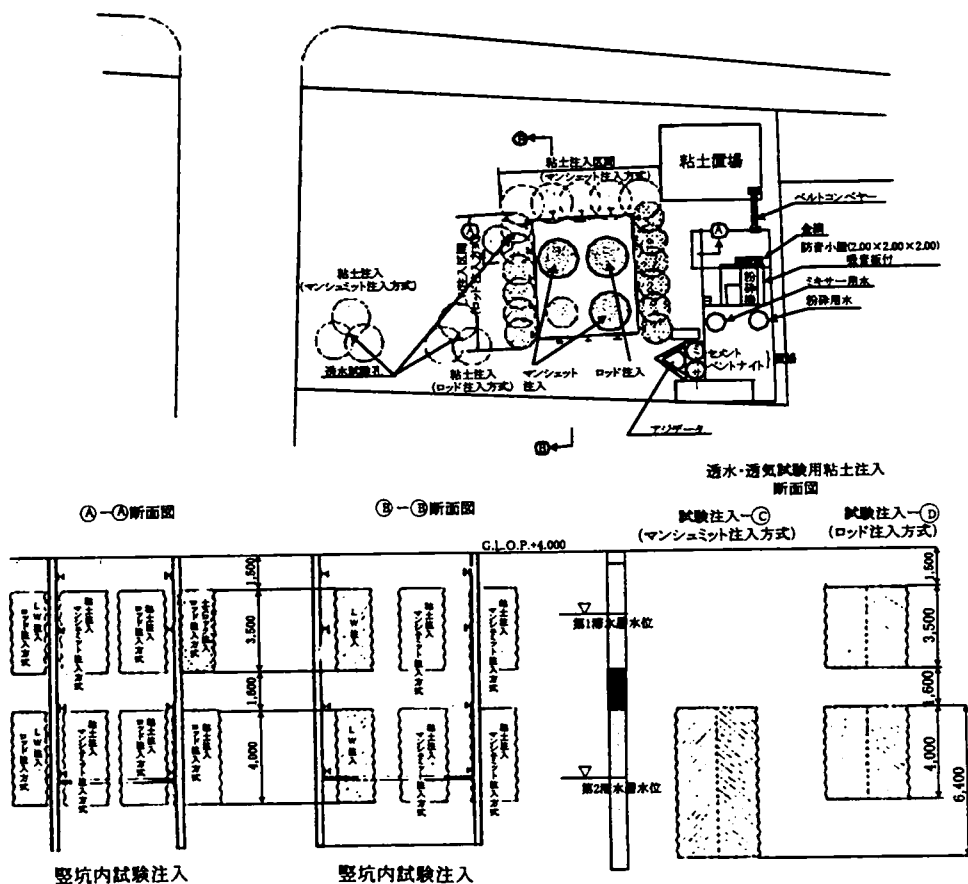


図 3 - 4 第 1 次現場注入実験全体図

表 3 - 1 使用粘土による 1 週強度の変化 (kN/m^2)

使 用 粘 土	水 比		
	2.5	3.0	3.5
大宮粘土	23	19	10
築港粘土	70	40	20

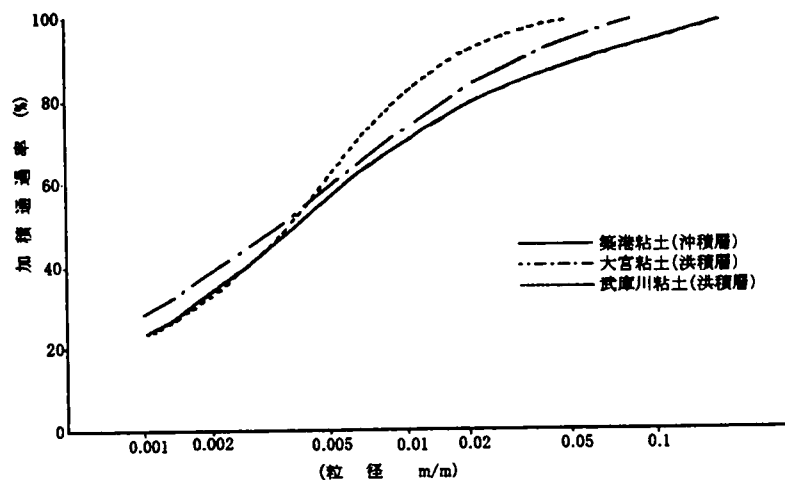


図 3 - 5 実験使用粘土の粒度分布

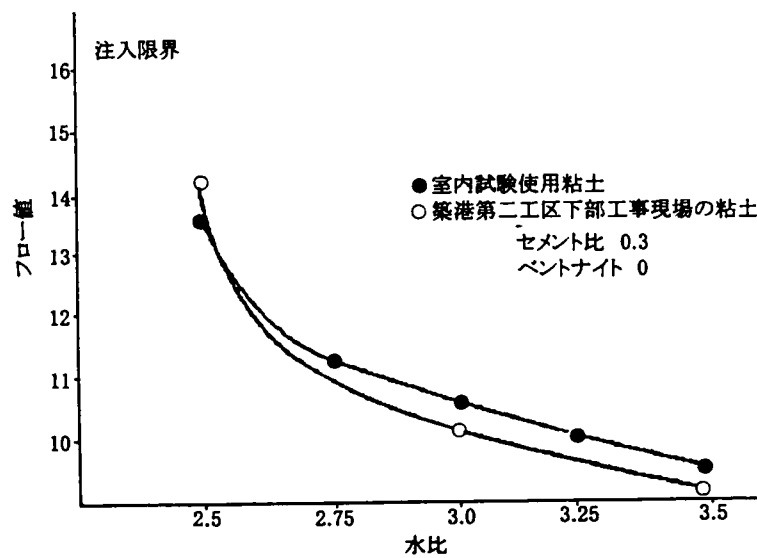


図 3 - 6 フロー試験結果

(2) 実験結果と課題

第1次現場実験の結果、粘土注入の効果について特に背面止水や透気試験、注水試験において他の市販の薬液と変わらない良好な結果を得たが、一方、掘削に伴う目視確認では砂層内への顕著な浸透注入を確認することができなかった。この原因としては以下の問題をあげることができる。

① 注入本数と注入順序の問題

堅坑掘さく部内への注入本数が少なく、また粘土注入を先行したため、注入材の多くが弱い部分へ浸透したこと。

② 使用粘土と注入対象層の間隙の問題

使用粘土が沖積層のものでシルト分が多く、また砂礫層もよく締まっている。

③ 注入材の粘性とゲルタイムの問題

これは粘土注入に関する本質的な問題である。特にゲルタイムをもたない点は自硬性パッカーの役割が期待できず注入方式の問題とも関連してくる。また粘性の問題も注入可能な地盤の範囲に大きな制約となる。

④ 注入地盤中における粘土・セメントと水の分離の問題

これは注入中に地盤内で起こる濾過現象によるもので、注入された量と地盤内で固結する量とが大きく異なる原因となる。このことは逆に、注入固結分の強度が配合試験によるものに比べはるかに大きいことから知られる。

⑤ 注入方式の問題

施工方法ができるだけ簡単で、③に述べた粘土注入の問題を解決できる注入方式、注入管理方法の改善が課題となる。

⑥ H鋼建込みによる地盤のゆるみの問題

H鋼建込みのためオーガー穿孔時の周辺地盤のゆるみが大きく、注入が多く杭周辺

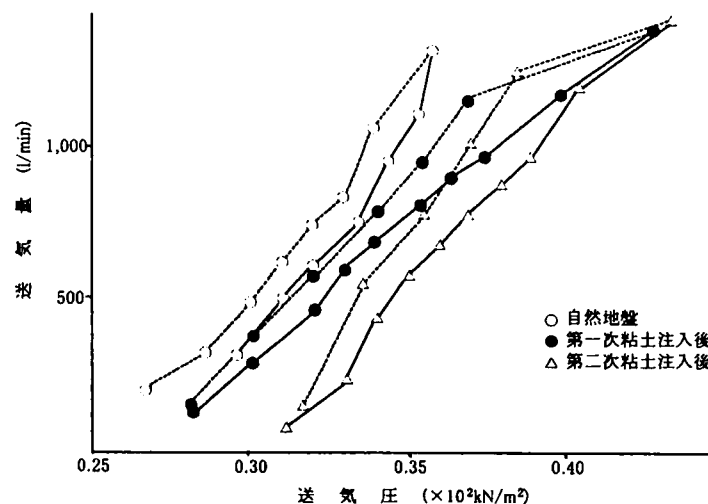
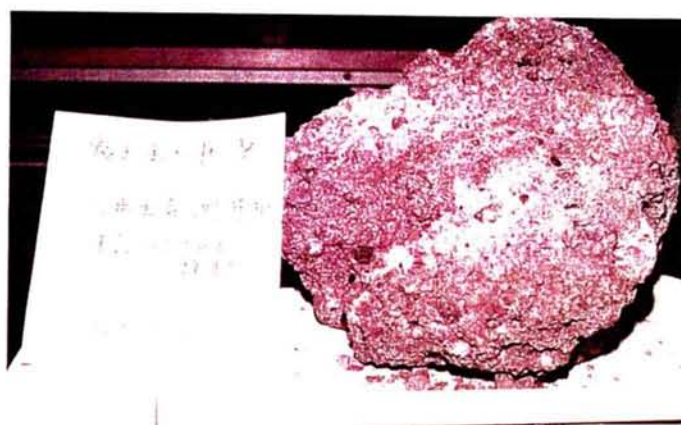


図3-7 透気試験結果（送気量と送気圧の関係）

に集中した。写真3-1(1), (2)に堀削に伴い見られた注入状況を、また、図3-7には透気試験の結果を、それぞれ示す。



(1) 脈（板）状注入状況



(2) 粒子間注入状況

写真3-1 第1次現場実験注入状況

3.2.3 第2次現場注入実験

(1) これまでの課題に対する対応

上述の第1次現場実験のいくつかの課題について検討した結果、特に①粘土の種類と②ゲルタイムとについて以下のような対応を実施した。

(a) 使用粘土の選別

室内実験に使用した大宮洪積粘土に近い性質をもつ武庫川の洪積粘土を使用することにした。その粒度分布は図3-5に併示したが、その分布の形状および最大粒径からみて明らかに築港沖積粘土より粒径が小さく注入に有利であることが知られる。

懸濁液タイプの注入材について注入性の判定基準としてグラウタビリティーが用いられている²⁾。

これによると

$$F_1 = \frac{D_{15}}{G_{85}} > 15 \quad , \quad F_2 = \frac{D_{10}}{G_{95}} < 8 \quad (3.1)$$

ただし、 D_{15} 、 D_{10} ：注入対象地盤の 15、10% 径
 G_{85} 、 G_{95} ：注入材の 85、95% 径

のとき注入可能としている。

表3-2は築港粘土および武庫川粘土について第2滞水層のグラウタビリティーを求めたものである。これによると武庫川粘土はグラウタビリティ基準を満たしていることから可能と判断した。

表 3 - 2 粘土注入のグラウタビリティー

	築港粘土	武庫川粘土
G_{85}	0.028mm	0.015mm
G_{95}	0.080mm	0.023mm
$F_1 = D_{15} / G_{85}$	8.9	21.7
$F_2 = D_{10} / G_{95}$	2.0	7.4

(b) 水ガラスの添加とゲルタイム

粘土注入材に化学的な薬品を添加しゲルタイムをもたせることは、粘土性入の本質からいく分はずれるが、これに関するいくつかの実験を行った。

配合は粘土、水ガラス混合液 200cc にセメントを Xg 添加することとし、次の3つのパラメーターを設定した。ここでパラメータは、これまで述べてきた室内実験および第1次現場注入実験に用いたものと異なるものを用いている。

$$\text{粘土液比} = \frac{L_0}{L_0 + W + Si} \quad , \quad \text{水ガラス比} = \frac{Si}{L_0 + W + Si} \quad , \quad \text{水比} = \frac{W}{L_0 + W + Si}$$

ただし、 L_0 ：粘土液（乾燥粘土に対する含水量を 224.4% に調整した液）量

W：水量

Si：水ガラス量

これらのパラメーターに対し、64通りの組み合わせについてゲルタイム試験を行ったが、図3-8は水ガラス比 15% の場合のゲルタイムとセメント量の関係を示したものである。これによると、ゲルタイムに影響を及ぼすのは主としてセメント量と粘土液比で、セメント量が多いほど、粘土液比が大きいほどそれぞれゲルタイムは早くなる。そして、

配合により数 10 秒から 15 分程度までの間で、任意にゲルタイムを変えうることが知られた。

(c) 土槽注入実験

以上のような対応が現場実験での成果につながることを確認するために、土槽を用いてのモデル実験を行った。

土槽は径 58cm、高さ 90cm の円筒形のものを使用し、図3-9に示すような状態に第2滞水砂れき層の砂を充填した。充填にあたっては乾燥密度および含水比が現地盤の状態にできるだけ近い状態になるように締固めた。注入は2重管方式によったが、本方法はまず瞬結性薬液を用いて注入管と地盤の間隙を充填し、しかる後に所定の注入材を注入するものである。

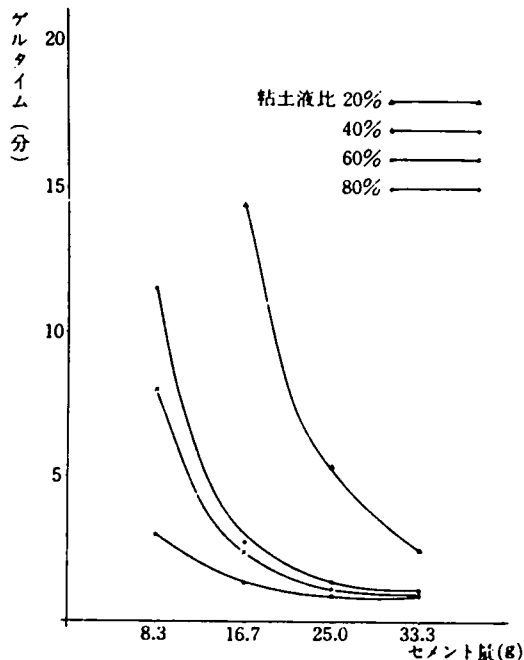


図 3-8 ゲルタイム試験結果 (水ガラス 15%)

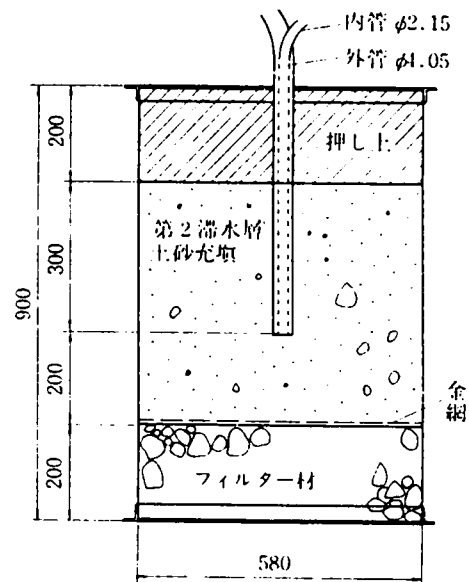


図 3-9 注入実験用土槽

(2) 第2次現場注入実験

第1次室内実験から第1次現場注入実験を経て土槽注入実験に至るまで各種実験を繰り返してきた結果、ローカルクレーを注入材として実用化する見透しを得た。第2次現場注入実験はいわばそれらの総決算ともいえるべき実験となっている。

(a) 実験概要

注入は第2滞水層のみを対象とし、第1次現場注入実験での種々の反省を十分考慮に入れて実施した。第2次現場注入実験の全体計画図を図3-10に示す。竖坑としては、図3-1の平面図において中央部の区画を利用している。

前回の実験では注入本数が少なく弱い部分への逸流が大きかったが、今回は図3-10にも示したように掘削全面に種々の注入を行い、全体的な改良効果をあわせて検討した。

i) 注入材

粘土系注入材の他、主として水ガラス等の市販薬液も比較のために使用した。これら配合およびゲルタイムは表3-3に示す通りである。

表 3 - 3 注入材の配合表

注入材名	配 合				ゲルタイム
	A 液(100 リットル中)		B 液(100 リットル中)		
急結 CL 3 号	Si 粘土 残り	30 15kg 水	セメント 粘土 残り	23kg 14kg 水	1 分 30 秒
粘土 (水比 3.5)	セメント 粘土 残り	8kg 18kg 水	—		—
スーパー ペロ LW	Si 水	50 50	スーパーペロ セメント 残り	20kg 水	1 分 10 秒
急結 CB	Si 水	20 80	セメント ベントナイト 残り	30kg 3kg 水	2 分 30 秒
瞬結材	Si 水	50 50	セメント CaCl ₂ 残り	20kg 5kg 水	数秒

ii) 注入方式

注入方式は第 1 次現場実験に採用したマンシュット注入方式、土槽実験で実施した二重管方式およびストレーナ方式、ゾーン注入方式の計 4 方式について実施した。このうちストレーナ方式はロット注入管の代わりにストレーナー管を用いるもので、またゾーン注入方式は数本～数 10 本をステップ毎に仕上げていく方法でストレーナー管は埋殺しとなる。

iii) 注入管理

注入に伴う種々の施工管理は第 1 次現場実験とほぼ同様であるが、ただ今回は注入量を注入孔 1 本当たり 600 リットルと規定し、これを注入するための必要圧力で比較検討する方式とした。また注入量、注入圧の測定記録はすべて自記記録計を使用した。

iv) 注入状況の確認と現場透水試験

注入後堀さくに伴い各注入材の浸透を確認すると同時に、現場で注水式の透水試験を行い改良効果を検討した。

なお、図3-10にも示したように粘土モルタル透水壁の実験もあわせて行ったので、第

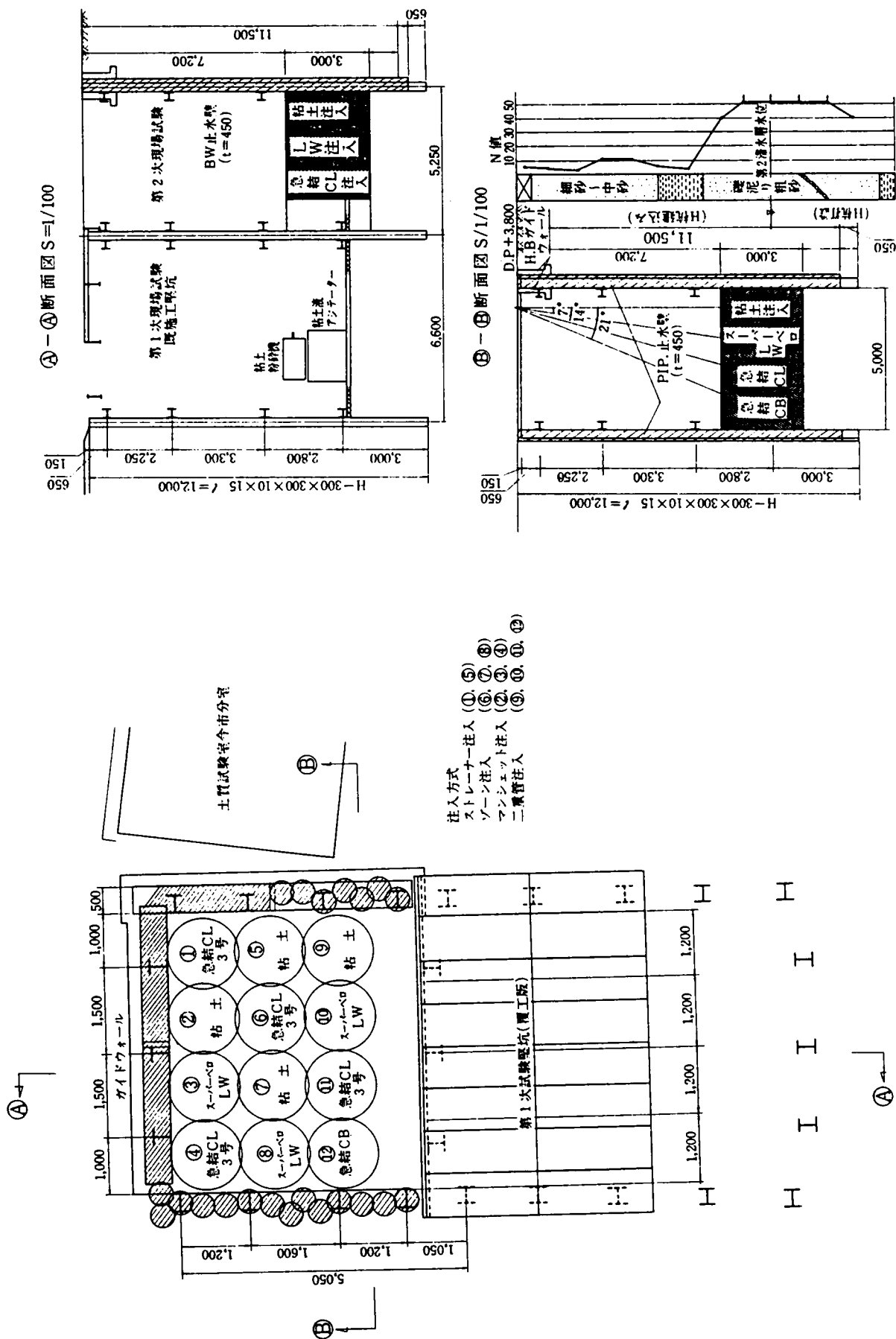


図 3-10 第2次現場注入実験全体図

1 次現場実験のように、H 鋼周辺の集中的な注入は避けられるものと考えられる。

(b) 実験結果

i) 注入状況

第 1 次現場実験同様堀さくに伴い各深度における注入状況を確認した。これらの目視による状況を図 3-11 に示すが、これによると上部シルトやシルト層下の部分に注入がよく浸透しており、注入目的深度より上部に注入され易いという一般的な傾向が確認された。

竪坑内の改良範囲と注入量との関係から注入率が 12% 程度であることを考慮すると、全体的にみてかなり良好な結果といえよう。しいて注入材別に傾向をみると、やはりスーパーベロ LW、急結 CL、粘土の順となるがそう大きな差はない。また注入方式別には二重管注入方式で良好な結果を得ており、続いてマンシェット注入、ゾーン注入の順で、ストレーナー注入はトラブルが多く注入効果も悪い。

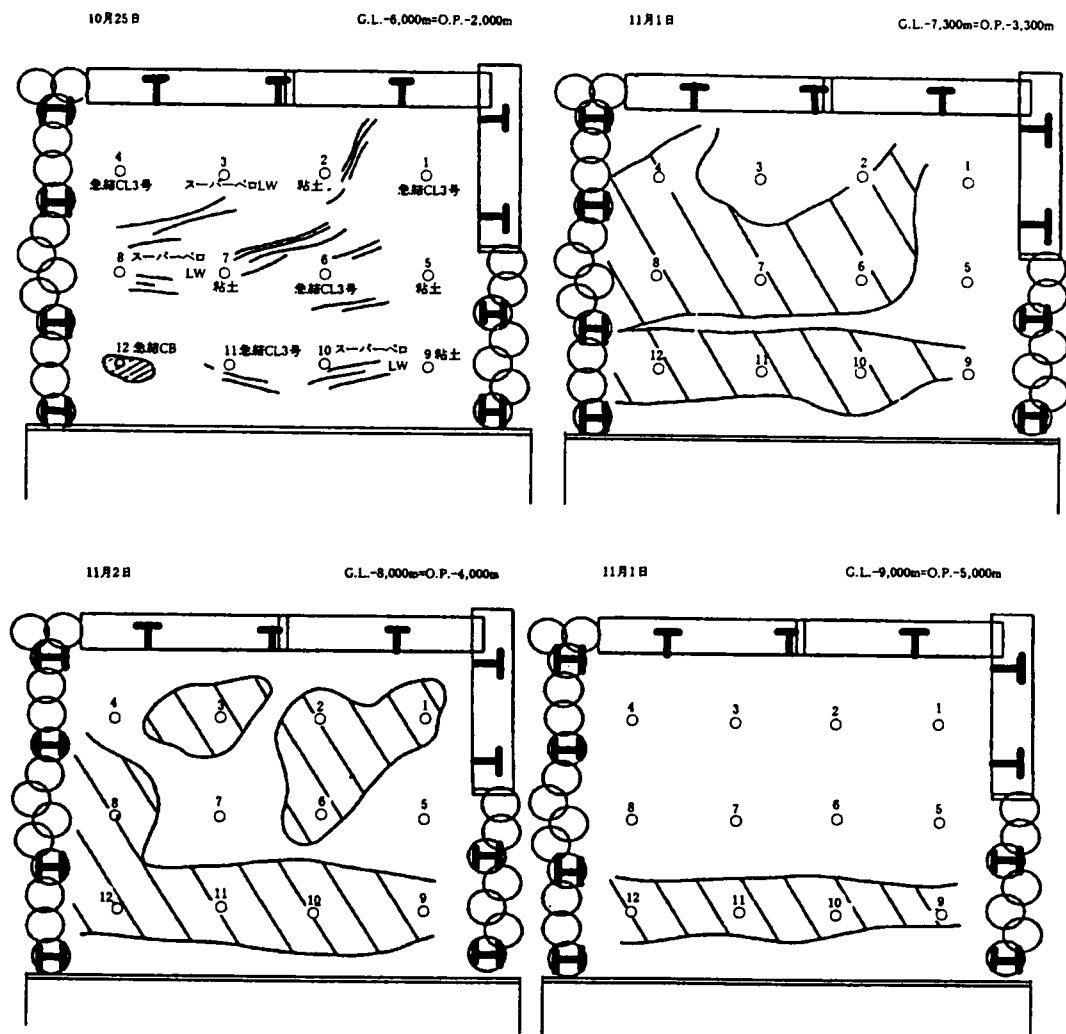


図 3-11 注入状況

ii) 透水試験

現場透水試験は GL-8,500 付近で行い、図3-12に示すような結果を得た。試験の方法は、地盤中に設置したケーシング孔に注水し、その流量から次式により透水係数を求めるものである³⁾。

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \left[\log_e \left\{ \frac{h}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r} \right)^2} \right\} - 1 \right] \quad (3.2)$$

ここに k : 透水係数 (cm/sec), Q : 流量 (cc/sec)

h : 水頭差 (cm), r : ケーシング径 (cm)

試験結果によるといずれも 2~3 オーダー改良されており、とくに 2 重管方式の部分については良い結果となっている。ただし、2 重管方式の部分は第 1 次現場注入実験の背面粘土注入と一部重複するので、全面的に 2 重管方式の優位性を強調することはできない。写真3-2は注入材別に注入されている状況確認の風景を示している。

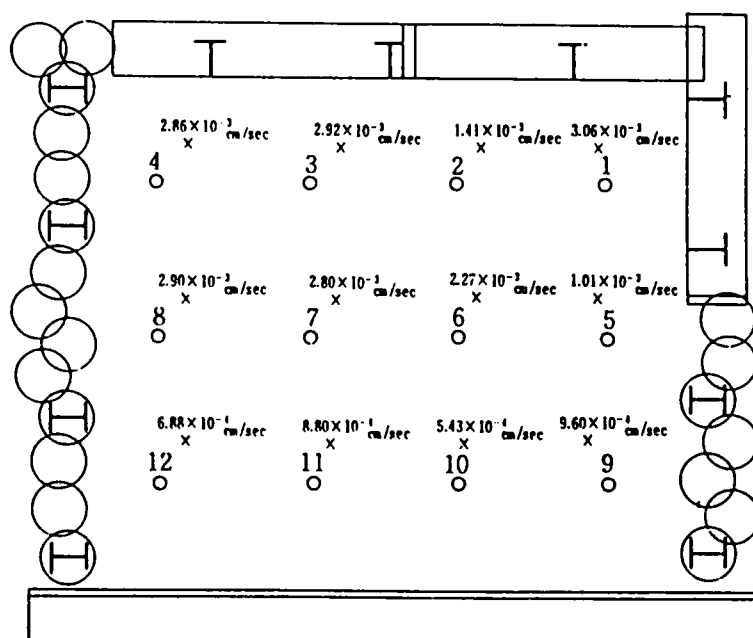


図 3 - 1 2 現場透水試験結果



写真 3 - 2 現場注入状況確認

(3) まとめ

地下鉄工事での採用も視野に、ローカルクレーを利用した安価な注入材を開発すべく実験的研究を行ってきた。大阪地下鉄工事における滞水砂礫層シールド工事に対しての粘土注入の実施は、いくつかの事情により実現されなかったが、これまで述べてきたような実験結果を総合し、粘土注入の適した条件としてつぎのような結論を得た。

- ① 地盤条件：砂礫層（透水係数 $k > 10^{-1} \text{cm/sec}$ ）、沖積シルト層
- ② 粘土条件：付近で多量のローカルクレーが得られ、粘土鉱物が多く含まれていること。
- ③ 注入範囲：線としての改良より、マスとしての改良に適する。また量も多いこと。
- ④ 注入方式：二重管注入方式やマンシット注入方式のように、ある程度高圧注入の可能な方法またはジェットグラウドなど。

これらの条件が満たされるならば、粘土注入は有効で安価な地盤改良工法として注目されるであろうし、また第 1 章 2. 2. 1 でも紹介した Blackwall トンネル注入地盤改良の例のように、他の市販の薬材と併用するのをもひとつの方法と考えられる。

なお、第 2 章にも述べたように、ローカルクレー等現地発生土を用いての地盤注入については、1960～70 年代に岩田や筆者らによる研究がなされた後しばらくは議論の展開が途絶えていたが、最近になって合理的かつ経済的な岩盤止水を目的としたグラウチング工事の方法として再認識され出でてきており、例えば貝沼らによる研究がある。⁴⁾

筆者らの研究が、新たな展開を見せることを期待したい。

3. 3 地下鉄工事他における粘土モルタル遮水壁工法^{5), 6)}

3. 3. 1 大規模現場実験

(1) 実験概要

第1章に述べた種々の実験結果により、大阪粘土が遮水壁材料として十分使用できる見通しが得られたので、前節の注入実験に使用した豎坑掘削工事のためのH-横矢板工法による土留遮水壁として現場実験用に採用した。本豎坑では、粘土注入実験を含めて図3-13(1)平面図にも示すように3つの区間に分割し、遮水壁については第2次、第3次がこれに相当する。その豎坑の断面図と土質柱状図とは、図3-13(2)に示す通りであるが、中間部にシルト層を挟んで上下に2層の帯水層を有しており、遮水壁を施工していない第1次現場実験部の掘削では出水が激しくウエルポイントと止水注入を併用し、縦矢板工法によりようやく掘削を行ったような状態である。

この粘土注入に関する現場実験（第1次現場実験）については前節に詳述しているので、ここでは遮水壁に関わる第2次、3次現場実験について述べることにする。

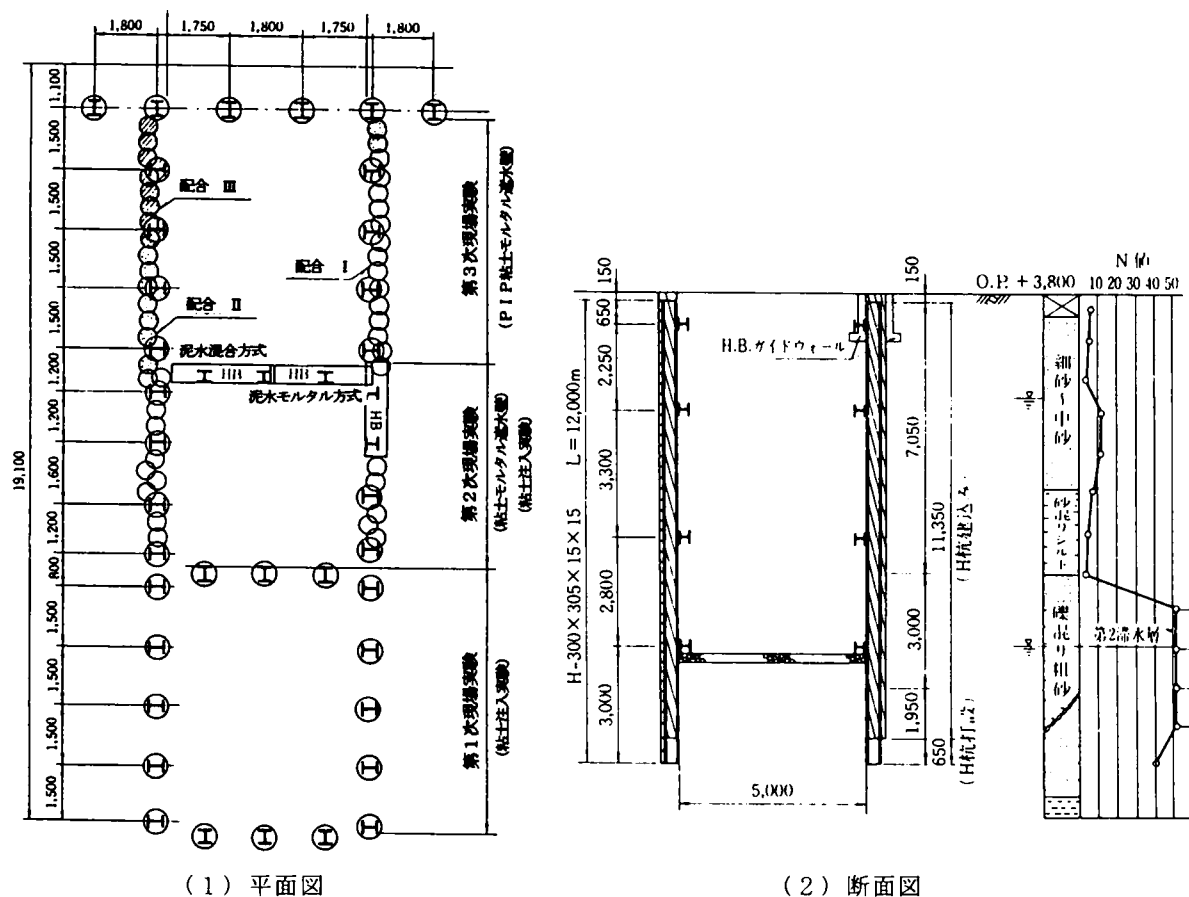


図3-13 現場実験用豎坑（単位：mm）

(a) 実験概要

各工法についての実験概要は以下の通りである。

オーガーによる削孔後、従来のモルタルに代わって粘土モルタルを噴出しながらオーガーを上昇させ、粘土モルタル杭を造成する。ジョイント部の施工は 5cm のラップ施工とし、既施工の杭を削り取る方式とした。配合は上述の標準配合である。

これについては、2. 2. 4でも述べたように以下の3つの方式に分けられる。

安定液としては比重 1.1 の粘土泥水を使用し、粘性を確保するために 0.2% の CMC を添加した。この安定液により掘削面を安定させながら掘削を完了させ、その後標準配合の粘土モルタルをポンプ圧送し置換した。本実験は比重差の小さい材料でも十分置換されるかどうかの確認が一つの課題である。なお、置換により回収された粘土泥水安定液は、比重を調整して粘土モルタルの材料に再使用することにした。

安定液として比重 1.2 の粘土泥水を使用し掘削を行い、掘削完了後 W : C : S = 1 : 2 : 2 のモルタルを対粘土泥水に対し重量比率で 50% の割合で圧送し、掘削地盤内で標準配合になるように混合する。この圧送、混合には図 3-14 に示すような特殊な装置を開発

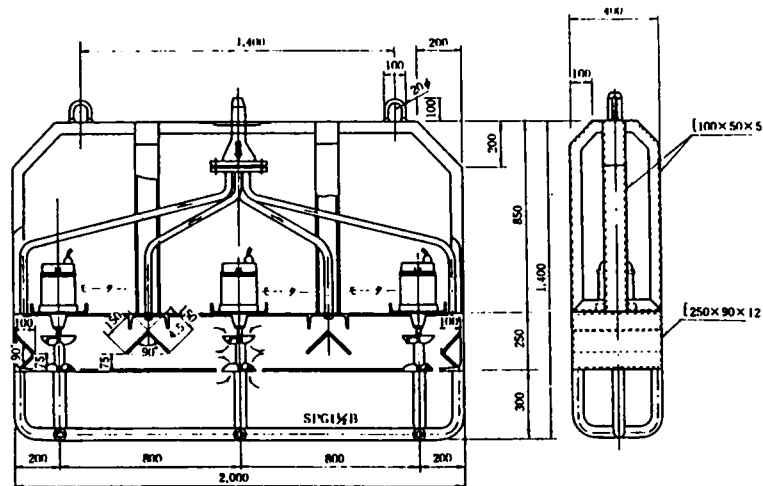


图 3-14 地中混合機 (单位: mm)

したが、その仕組みはプラントから圧送されたモルタルが装置の上部で4方向に分流し、流出点でインペラーにより掘削内の粘土泥水と攪拌され均質な混合を行うものである。

本方式でも、20～25%の泥水が回収されるが、次エレメント掘削の安定液の一部として使用できることはいうまでもない。

③ HB工法泥水モルタル方式

安定液としての泥水モルタルの配合は、第2章の表2-3に示した標準配合の $W:C:L:F=2:0.5:0.4:0.1$ とし、分散剤として0.5%のテルナイトBを添加した。本方式による場合は、掘削中の粘性と比重の変化の管理が重要となる。

(b) 実験結果

実験は大きく分けて、施工中のプラントおよび掘削壁内における粘性、比重、強度などの変動とそれらの相関関係を調べる管理関係の実験と、縦坑掘削に伴うジョイント部の止水性や出来上がった粘土壁の強度等、主として施工性をみる実験とに分けられる。これらの結果のうちいくつかの顕著な傾向を列挙すると、以下の通りである。

- ① PIP方式による粘土モルタルの食い込み量は約10%で、また、打設後の最終沈下量は杭長の8.7%であった。
- ② PIP方式の場合のラップ施工について、早期ラップの場合には既施工杭の方向にオーガーが寄る傾向となり問題がある。したがって少なくとも3日程度経過してラップ施工するのが好ましく、一方、逆に長期間放置した場合は問題はない。

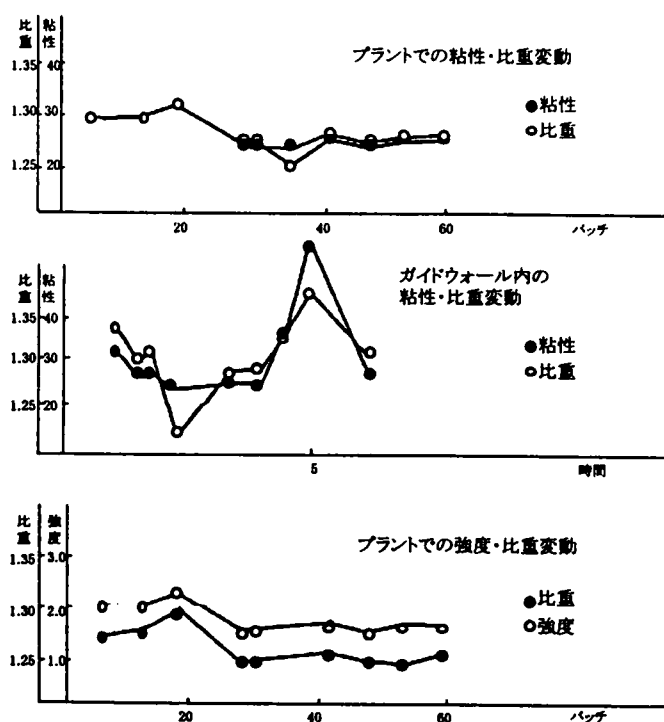


図3-15 泥水モルタル方式に伴う諸値変動

- ③ HB連続壁方式については、いずれの方式も粘土泥水および泥水モルタルが安定液として十分有用であることが確認された。とくに心配された泥水モルタル方式では、ファンネル粘性で最高 55 秒まで粘性が上昇したが、ロスの大きさを除き施工上問題はなかった。図3-15は泥水モルタル方式についての管理試験結果を示している。
- ④ 連続壁方式の場合、1 エLEMENT施工に当たっての泥水的设计数量に対するロスは、とくに泥水モルタル方式で 40%と大きい。この中には掘削幅の増大、土中への逸水、掘削土と共に処分されるものなどが含まれる。
- ⑤ 竖坑掘削に伴う仕上がり状況の確認では、PIP 方式による翌日ラップの 1 カ所を除いて、ラップ施工および止水状況はほぼ完全で、とくに連続壁部についてはジョイント部が見分けにくいほどであった。
- ⑥ 竖坑掘削に伴い各タイプの遮水壁から深度 1m 毎に試料を採取し、一軸圧縮試験を行った。その結果は図3-16に示す通りで、これによるといずれの方式でもほぼ一軸圧縮強度 300kN/m^2 以上の壁が形成されており、ツルハシやスコップでの掘削が可能で、横矢板を入れる作業も能率良く行えた。

写真3-3は HB バケットによる試験施工の状況を、写真3-4は掘削に伴い確認された粘土モルタルの仕上り状況を、それぞれ示している。

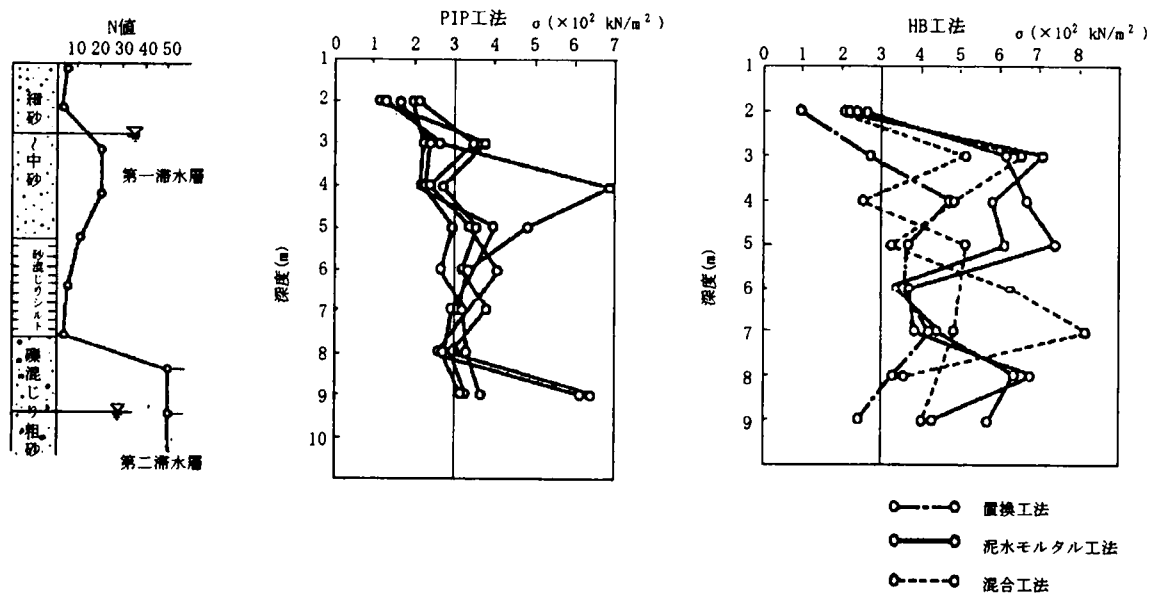


図 3 - 1 6 粘土モルタル遮水壁の強度分布



写真 3-3 HB連続壁工法



写真 3-4 泥水モルタル遮水壁の仕上り状況

(3) 第3次現場実験

第3次現場実験の目的は、滞水砂礫層シールドにおける遮水壁としてこれまで述べてきた粘土モルタルを使用した場合の実用性を確認するもので、使用する粘土の違いによる差と、それらの当初交通局設計のモルタルとの比較等を検討するものである。

使用した配合は表3-4に示す3種類で、配合Ⅰ、Ⅱは粘土モルタル、配合Ⅲは交通局仕様のB配合モルタルである。これらはいずれも単位量で示されているが、配合Ⅰはこれまで述べてきた標準配合を、配合Ⅱは粘土泥水比重1.2に対し1:3:3モルタルを50%配合したものを、それぞれ単位量に換算している。

表 3 - 4 第 3 次現場実験配合

配合	W/C+F	単 位 量				
		C	W	F	S	L
I	420.0	186	781	—	186	247
II	368.8	205	756	—	205	270
III	114.0	200	456	250	963	—

(a) 配合試験

沖積粘土として現場周辺に分布するシルト質粘性土および東大阪粘土（粒度分布については前章図2-19参照）についてこれまでと同様の手順で配合試験を実施した。その結果の一部として、これら 2 種類についての配合 I、II 関する養生期間と強度との関係を示したものが図3-17である。これによると、とくに東大阪粘土は強度がやや低く、またブ

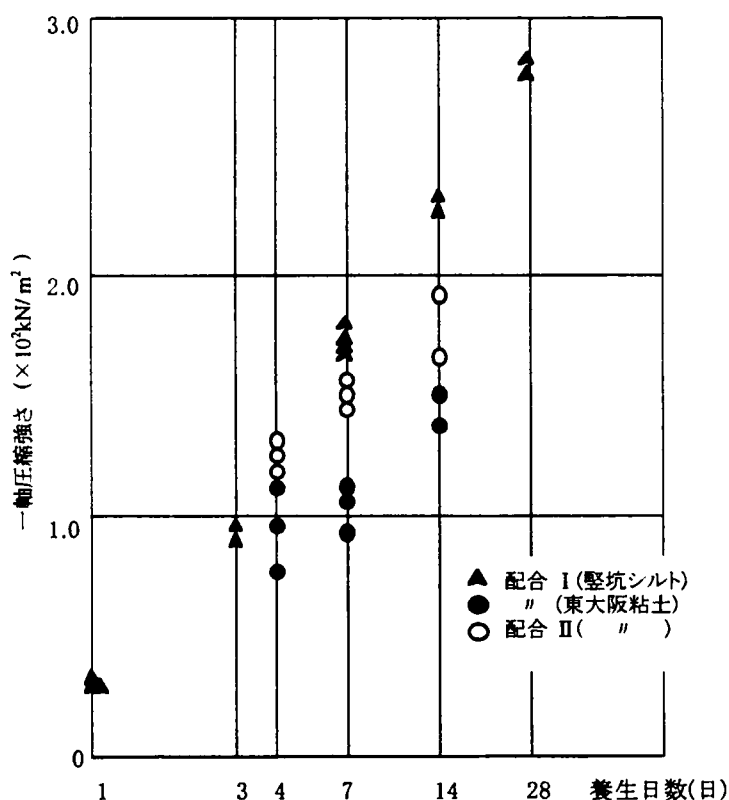


図 3 - 1 7 沖積粘土使用モルタルの強度特性

リージングや粘性についても武庫川洪積粘土におよばず、品質的に若干劣ることが知られた。これは、東大阪粘土はモンモリトナイトを中心とした粘土鉱物がほとんど含まれず、界面化学的な性質が小さいことによるものである。

(b) 現場実験結果

上にも述べたように東大阪粘土は、洪積粘土など他の材料より劣ることが知られたが、現場実験ではかなりの量を使用するため、調達の関係からそれを採用することにした。

いくつかの実験結果のうち、施工性については、配合ⅠおよびⅡについてはほとんど差はなかったが、配合Ⅲについては一部ラップ施工に難があった。その結果、配合Ⅲでの施工部分では縦坑掘削時にそのラップ部分数カ所からかなりの出水が見られた。また、強度がかなり大きいため、横矢板挿入時にブレーカーによるはつり作業が必要になっている。

今ひとつの現象として、遮水壁施工中の材料ロスすなわち壁上面の沈下の大きさも問題であった。図3-18は、PIP 工法部分についてモルタル打設後の杭上面の沈下量と時間の関係を示したものであるが、これによると、沖積シルト粘性土である東大阪粘土の場合は、杭長の11～14%と洪積粘土の約9%に比べかなり大きい。ただ仕様配合である配合Ⅲの場合でも12%程度であることを考えると、実用的には問題はない。いずれにしても、これらの沈下は打設完了後約2時間でほぼ完了するので、増打ち等により対処する必要があるだろう。

以上のように、粘土の種類によっては粘土モルタルの品質にかなりの影響が出ることが考えられるが、PIP 方式の場合はベースとなる粘土泥水の比重を大きくするなどの処置で実用的に対応できるとの結論を得た。

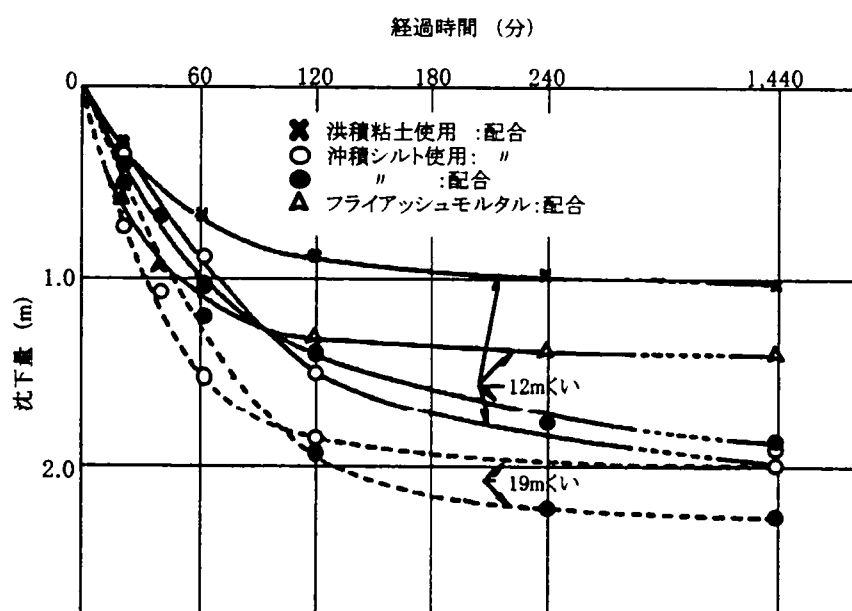


図3-18 粘土モルタル杭の時間～沈下の関係

3.3.2 滞水砂れきシールド遮水壁としての施工例 7), 8), 9), 10)

粘土注入および粘土モルタル遮水壁の研究開発は、地下鉄シールド工事の滞水砂礫層対策に関連して進められてきたが、対象となった大阪地下鉄2号線では総合的な判断の結果、後者の粘土モルタル遮水壁をシールド補助工法として採用することになった。

(1) 補助工法の概要

大阪市交通局地下鉄2号線（今市工区）は、全延長775m区間を外径約7mの単線シールド2本で施工するものであるが、このうち360m区間は旧淀川河床と考えられる地下水の豊富な滞水砂礫層となっている。この区間を補助工法区間として各種調査、試験、理論計算等により検討した結果、図3-19の標準断面図に示すように両側遮水壁を施工し、揚水井戸および薬液注入を補助的に用いる圧気工法を採用した。この場合遮水壁の役割は外部からの地下水の流入を防ぐと同時に、その外水圧に相当する圧気を内部から作用させる場合の漏気を防止することにある。したがって、地盤内には掘削や外水圧による不均衡な応力状態を発生させないので、遮水壁材としてはラップの施工性や変形特性から粘土モルタルを使用した。変形・応力特性は有限要素法解析でも検討し、安全性を確認している。なお補助工法をはじめ当シールド工事の計画と施工については文献7)～10)に詳しい。

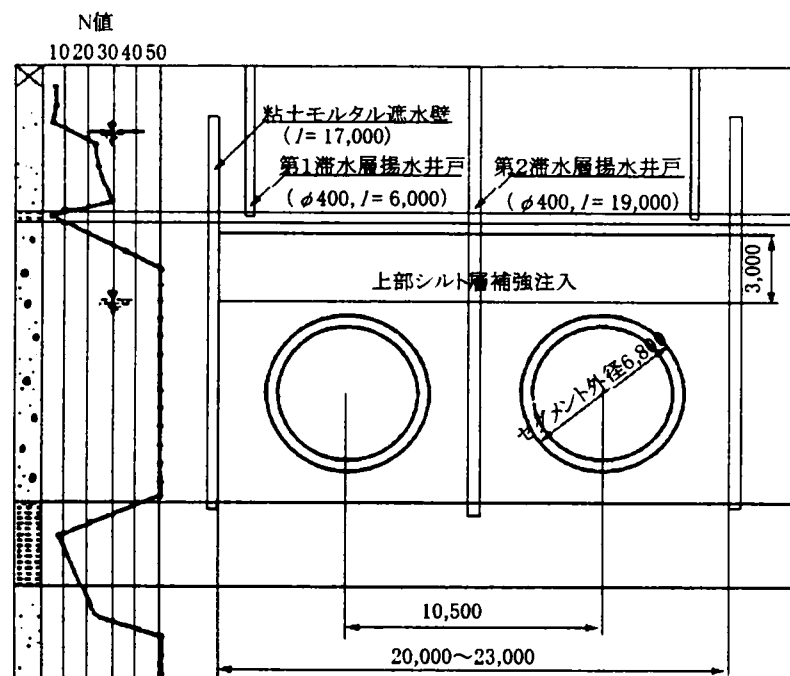


図3-19 シールド補助工法標準断面図

(2) 遮水壁の施工

遮水壁工法としては連続壁タイプが有利と考えられるが、主として道路占用と経済性の関係で PIP 工法による柱列杭タイプを主体とした。その他特殊部分として HB 工法による連続壁部、PIP 欠損部薬液注入、および歩道橋下のボーリング機械による部分等が含まれるが、それらの実施数量は表3-5に示す通りである。

表 3 - 5 遮水壁実施数量表

工 種	北側遮水壁	南側遮水壁	横断隔壁
総延長 (m)	359.54	365.40	21.35
PIP 延長 (m) (本数)	314.80 (896)	311.15 (888)	21.35 (61)
HB 延長 (m) (エレメント数)	27.50 (11)	—	—
BH 延長 (本数)	5.6 (16)	4.2 (12)	—
薬液注入延長 (注入量 m ³)	11.64 (213)	50.05 (642)	—

施工中の特筆すべき事項について簡単に触れておくと、まず PIP 工法そのものについては、基地での現場実験等従来の方法と全く同様であるが、注入は布掘部に沿って配管した 2 インチのガスパイプを通して基地のポンプから直接圧送して行った。この点は粘土モルタルを用いることの大きな利点で、占用内にはオーガー削孔機械のみで施工がスムーズに行えた。またラップ施工は 4 日以上経過することを原則としたが、実際には 2 日以降の任意の時期にラップ施工が可能で、既施工杭のモルタルが残土として搬出された。

沈下については平均的にみて 1.2~2.0m と、実験の場合と同様 10% 前後で、占用撤去前に配管の洗條をかねて充填する程度で十分である。

つぎに HB 連続壁については、基地前の道路占用に余裕のあった部分について 11 エレメント (27.5m) を泥水混合方式で施工した。この部分は土質の関係で、掘さく中比重、粘性が大きくなったので、調泥時に比重 1.13、粘性を 23 秒でコントロールした。混合は、図3-14に示した地中混合機を使用した。HB バケットの上下による混合でも十分と考えた。

(3) 粘土モルタルの作成

粘土は地下鉄 2 号線の隣接工区 (14、15 工区) より掘削残土として搬出される大阪層群洪積粘土を使用した。また粉碎機の故障などに備えて一部岡山笠岡産粘土 (袋物製品) を使用した。これらの粘土についての配合試験結果の一部を図3-20, 21に示した。

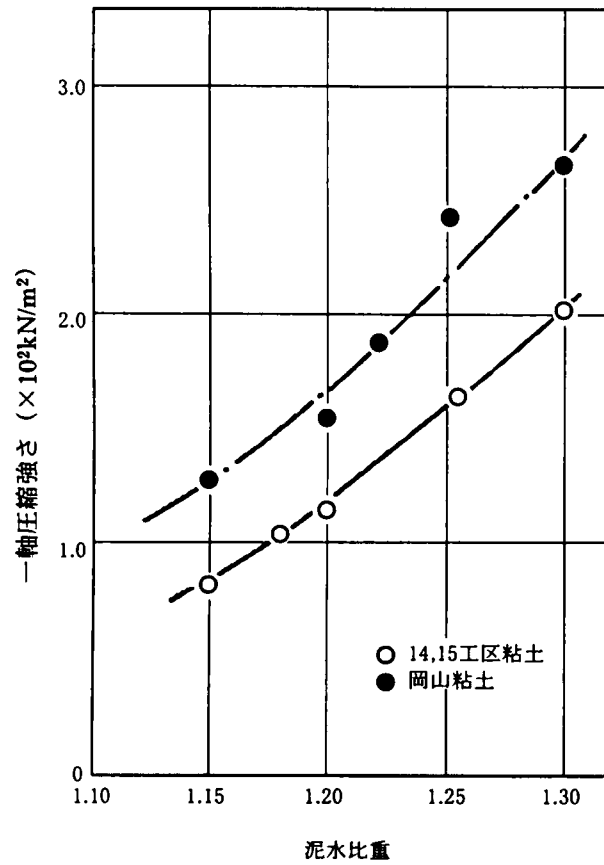


図 3 - 2 0 泥水比重と強度の関係

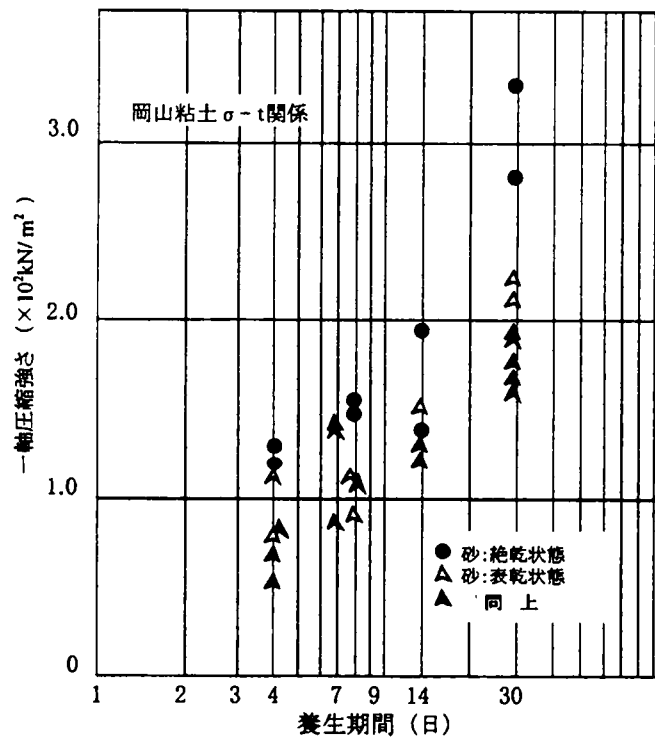


図 3 - 2 1 岡山粘土の強度特性

粘土モルタルの作成手順は図3-22に示す通りであるが、このうちもっとも問題となるのは粘土の粉碎である。粘土粉碎機としてはボールミルタイプのもの、スライスタイプのものがある。現場実験では前者を使用した、騒音が大きく粉碎能率も表3-6に示すようにスライスタイプに比べて劣る。このような点から本工事ではスライスタイプを使用した、粉碎の時点ではできるだけ高い濃度の粘土液を作成し、これを 50m³ 用地下プールにストック、使用時に水を加えて比重を 1.2 に調整する方法をとった。

粘土モルタルの品質管理については、実験結果から主として粘土液の比重、砂の含水比および粘土モルタルの比重が強度に与える影響が大きいことから、表3-7に示すような項目と頻度で行った。図3-23はその結果を示しているがほぼ目的が達成されている。

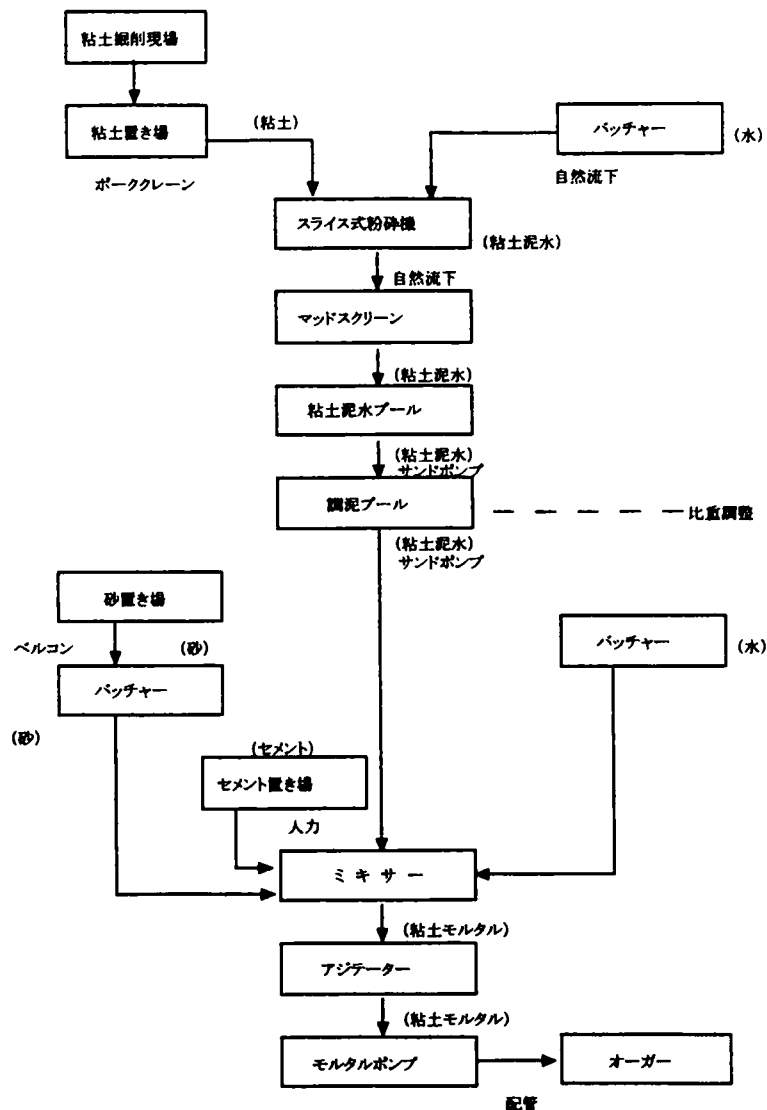


図 3 - 2 2 粘土モルタル作成の手順

表 3-6 粘土粉碎機の粉碎能力

作業内容	ボールミルタイプ	スライスタイプ
粘土・水の投入	5 分	5 分
機械セット	2 分	0 分
粉碎運転時間	20 分	10 分
粘土液排出時間	6 分	3 分
雑 時 間	2 分	2 分
1 回の粉碎量	1.2m ³	2.0m ³
1 回の粉碎時間	35 分	20 分
1m ³ 当り粉碎時間	29 分	10 分

表 3-7 粘土モルタルの品質管理項目と強度

試験項目	頻 度
粘土プールの泥水比重	1 日 2 回
砂の含水比	2 日に 1 回
粘土モルタル比重	1 日 2 回
粘土モルタル一軸試験	1 日 2 回・2 個
粘土モルタル透水試験	3 日に 1 回
粘土モルタル粘性	1 日 2 回

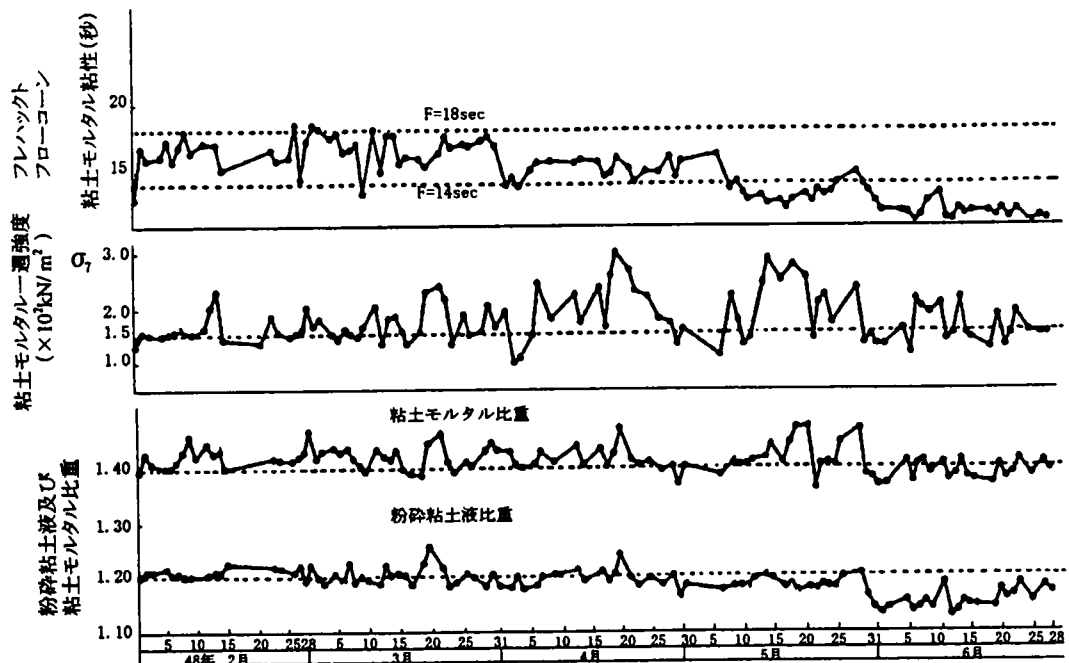
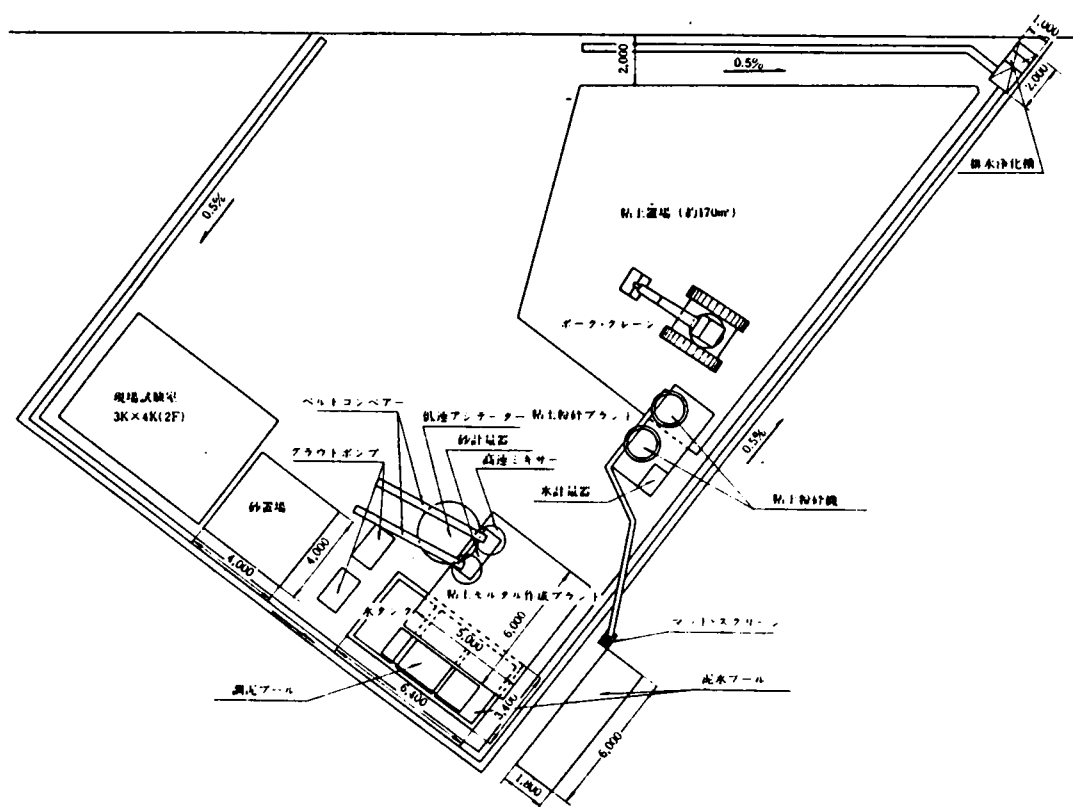


図 3-23 粘土モルタル品質管理図



このように作成した粘土モルタルは約 6,600m³、粉砕した粘土は約 1,500t（粘土塊にして 1,000m³以上）に及んでいる。図3-24にプラントの平面図を示す。

(4) シールド補助工法としての遮水壁の成果

① 遮水效果

遮水壁施工後シールド発進前に行った揚水試験では、みかけの透水係数が2オーダー低下しており、またシールド推進中は5本の井戸で計500リットル/minの揚水量によりスプリングライン付近の水位を保つことができた。これは当初計画の片側遮水壁で20m毎(計18本)に井戸を設置した場合の理論計算による1本当たりの揚水量3,000リットル/minに比べ、大幅な減少となっている。

② 圧気効果

シールド圧気は $30 \sim 40 \text{ kN/m}^2$ で湧水を阻止することが可能で、空気消費量も最大 $80 \text{ m}^3/\text{min}$ と透気試験による遮水壁のない場合の計算値 $170 \sim 280 \text{ m}^3/\text{min}$ に比べかなり小さくなっている。しかもこの実績にはセグメントからの漏気やロック開閉によるロスも含まれているので、遮水壁の漏気防止効果は予想以上といえる。

③ 地盤沈下に対する効果

車道部の地盤沈下量最大 30mm に対し、官民境界では高々数 mm とほとんど誤差の範

囲で、沿道家屋への影響は微少であった。これは遮水壁が縁切り効果をもつことを示すもので、このことは遮水壁上の歩道に現れた舗装のクラックによっても裏付けられた。

3.3.3 その他の施工事例

上記のシールド補助工法としての施工事例以外に、筆者の関係した粘土モルタルに関する施工実績は、1972年～1983年にかけて表3-8に示すように岐阜での実験工事¹¹⁾を含めて計7件となっている。ここではシールド遮水壁以外の、ポンプ室および開削工事で採用された施工事例について簡単に述べることにする。

表3-8 粘土モルタル施工事例(1972～1983)

工事名	使用目的	施工年	数量 (m ³)	使用粘土	備考
大阪市地下鉄 2号線(16工区)	豎坑のH横矢板工法 における背面止水	1972	160	洪積粘土 沖積粘土	粘土モルタル 遮水壁実験工事
同上	シールド工事に伴う 滞水砂礫層の遮水壁	1973	6,600	洪積粘土 岡山袋粘土	柱列工法遮水壁 シールド補助工法
同上 (ポンプ室工事)	支柱杭,土留杭 建込み	1974	200	洪積粘土 ベントナイト水	ボーリングマシン による施工例
名鉄岐阜駅実験工事	鋼矢板の建込み	1975	400	豊川粘土	
大阪市地下鉄 2号線(出入口工事)	支柱杭,土留杭建込み 一部遮水柱列杭	1976	700	岡山袋粘土	中間支柱杭 根固モルタル使用
建設省近畿地建 共同溝工事	支柱杭,土留杭建込み	1976	350	岡山袋粘土	中間支柱杭 根固モルタル使用
大阪市地下鉄2号線 (大日停留場工事)	支柱杭,土留杭建込み 全周遮水柱列杭	1981	4,000	岡山袋粘土	中間支柱杭 根固モルタル使用
大阪市地下鉄1号線 (新金岡停留場工事)	支柱杭,土留杭建込み	1983	3,000	岡山袋粘土	中間支柱杭 根固モルタル使用

(1) ポンプ室工事での施工例^{5), 6)}

シールド工法によってすでに施工完了した2つのトンネル間に地下ポンプ室を築造する工事で、その概要は図3-25に示す通りである。同図からも知られるように、支柱および土留杭を路上より先行して建込み、坑内で水平に圧入されたかんざし桁を支柱で受けながら切り拡げ掘削する工法である。この場合H鋼はGL-16m以下に建込み、それから上部はモルタル充填となるが、これがかんざしけた圧入の抵抗とならないように弱強度のもの

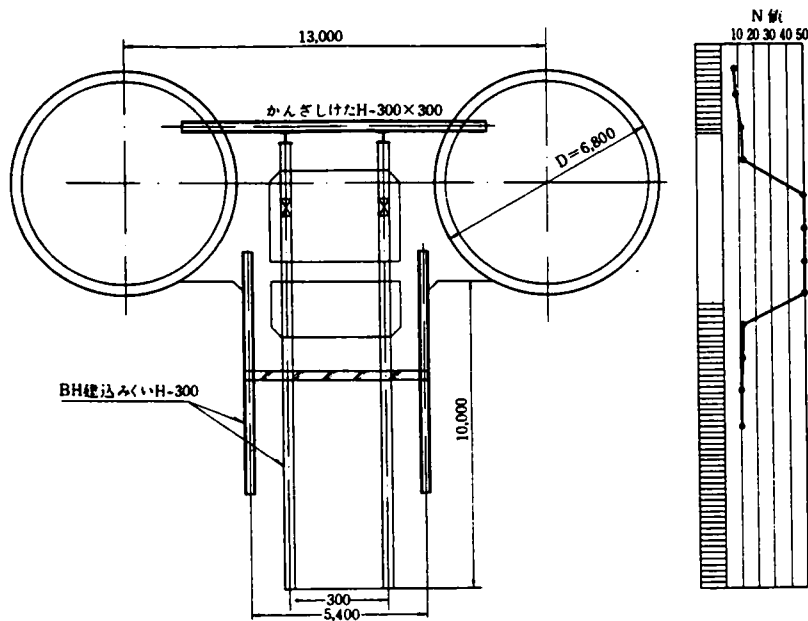


図 3 - 2 5 ポンプ室断面図（単位：mm）

を使用する必要がある。また、杭まわりのモルタル撤去も容易となるので、堀削盤以上については粘土モルタルを使用した。

掘削は最初ベントナイト安定液で行うが、掘削に伴い洪積粘土が泥水に混入し、粘性・比重が著しく大きくなる。したがってこれを薄めて安定液として使用する他、粘土モルタルの材料とした。この場合、泥水の比重を 1.2 に調整して標準配合の粘土モルタルを作成、置換方式により粘土モルタル杭を造成した。これらの 1 週養生の強度は平均 173kN/m^2 で、その結果かんざし桁圧入時の抵抗もなく、堀削時の固結状況もほぼ予想どおりであった。

（2）開さく工法での施工例^{5), 6)}

（a）地下鉄出入口および共同溝工事の例⁷⁾

開削工法で粘土モルタルを用いる場合の施工法については、豎坑での実験工事と同様であるが、当地下鉄工事に関連する出入口ならびに共同溝受託工事において H 鋼土留杭の建込みと一部遮水壁に使用した。図 2-26 に標準断面を示すが、その内訳は土留杭が約 240 本、鋼支柱 60 本および柱列杭が約 100 本であった。

この場合には主として数量の関係から前節で述べた岡山粘土を使用した。配合は土留杭、柱列杭については標準配合を、中間支柱については 1 週強度 $300\sim 500\text{kN/m}^2$ のものをそれぞれ使用したが、交通荷重による路面履工の沈下もなく、堀削中の施工性も良好であった。

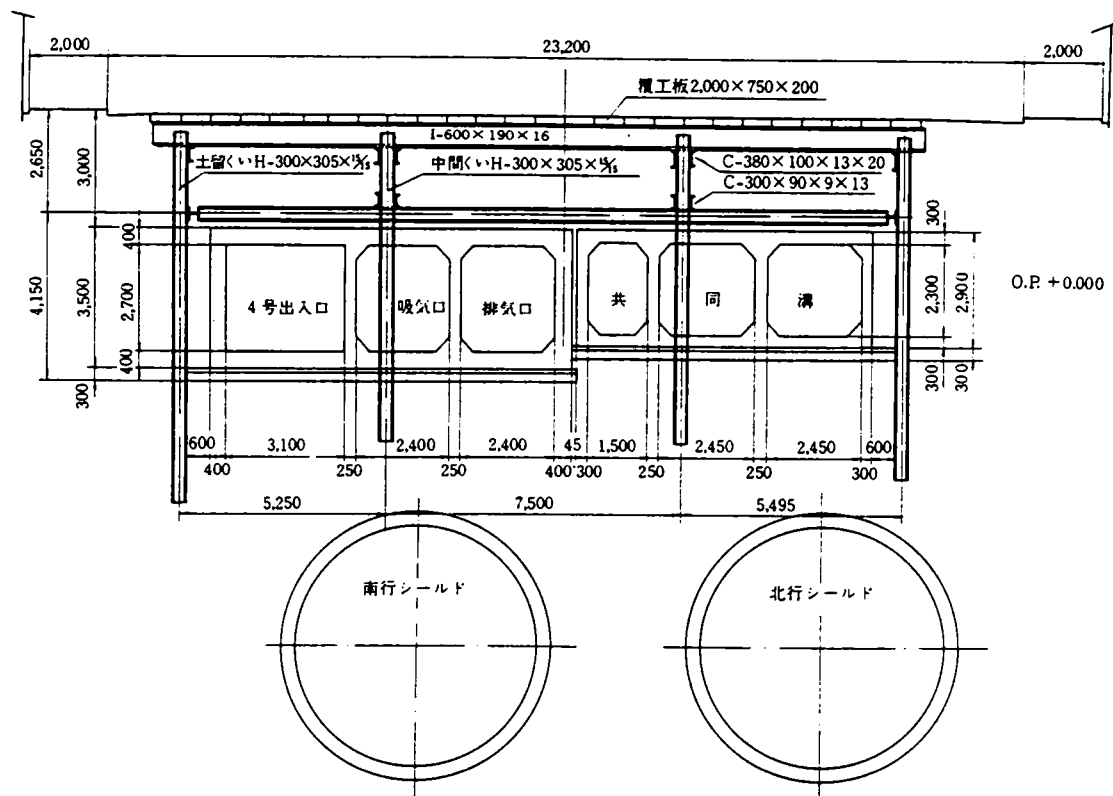


図 2 - 2 6 地下鉄出入口および共同溝標準断面図 (単位 : mm)

(b) 地下鉄 2 号線大日停留所工事の例 ¹²⁾

これまで述べてきた大阪地下鉄 2 号線 (16 工区) の延伸工事として発注された大日工区は、2 号線の終点に位置する大日停留場の一部と、折り返し 3 線部とからなる開削工法区間約 200m である。国道 1 号線下で、掘削深さは 17m~19m と深く、掘削幅も 18m~20m と当時としては大型の開削工事である。また、地質的には GL-10m までが地下水の豊富な滞水砂層となっており、粘土モルタルによる柱列杭タイプの遮水壁と土留壁としての木製横矢板との併用が採用された。

元設計では、図 3-27(a) に示すように強度のあるモルタル杭で遮水壁を構築することになっていたが、接点タイプのため施工上の誤差などによって欠損部ができやすく、特に国道下での工事と言うこともあり、遮水に重点を置いた代案の検討がなされた。

その結果、

- ① 杭モルタルを強度 $\sigma_{28} \cong 1200 \text{ kN/m}^2$ の岡山粘土モルタルとし
- ② モルタル杭の径を $\phi 500 \text{ cm}$ とし 5cm ラップとする同図(b)の方法が採用された。

このように強度の小さい遮水を目的とした粘土モルタル壁に対し、最終的には木製横矢板が土圧・水圧を支えることになるが、その横矢板挿入までのごく短い時間といえども安全な耐力を要求される。これに対しては、図 3-28 に示したような円弧アーチとしての解析を行い、それに必要な粘土モルタルの強度を深さごとに設定した。また、これらの破壊モ

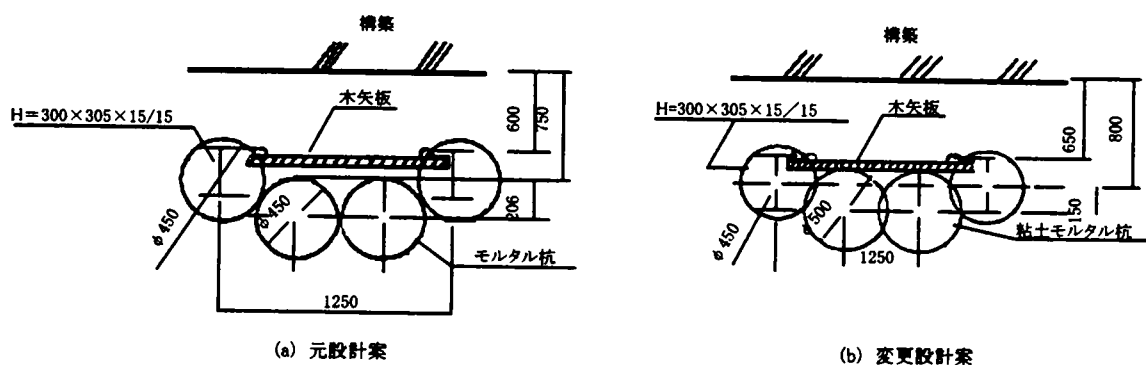


図 3 - 2 7 H-横矢板柱列杭遮水工法

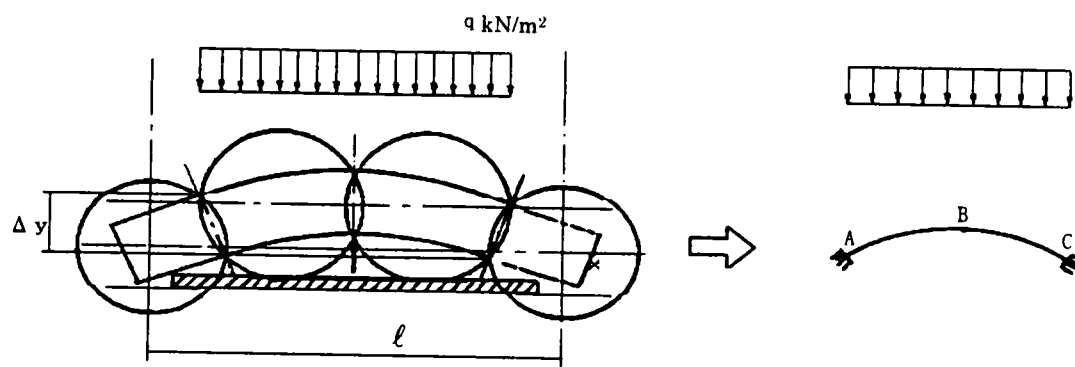


図 3 - 2 8 柱列杭のアーチ解析モデル¹²⁾

ード（破壊のパターンおよび破壊時の値）を確認するために模型実験を行い、良好な結果を得た。

このようにして施工された粘土モルタル杭は 1000 本以上に及んだが、横矢板挿入時の杭周りのモルタル除去も容易であり、大きな成果を上げることができた。

(c) 地下鉄 1 号線新金岡停留場の例¹³⁾

筆者が上記大日停留場工事に引き続いて担当した大阪市交通局地下鉄1号線(2工区)新金岡停留場工事については、遮水壁を伴わない H-横矢板工法による土留めが採用された。そのための土留杭(H-300)建込についてはアースオーガーによったが、横矢板挿入時のモルタル撤去を容易にするため、大日の場合と同様設計を変更して岡山粘土を用いての粘土モルタル工法を採用した。掘削に伴い短時間に横矢板を挿入できるため、背面地山のゆるみを最小限に抑えることができ、地盤沈下防止の一助となった。

なお、今回は遮水壁ではなくラップ柱列施工は該当しなかったが、今後の新しいシステムを見据えて2連および3連のオーガーによる同時多軸杭の機械開発と現場実験を行った。これらは、その後数年して一般化した SMW 工法に先んじた改良工法であったと言える。

3.4 地下鉄工事におけるReSM埋戻し施工^{14),15),16),17),18),19)}

3.4.1 シールド発生土を用いたReSM埋戻し工事概要

大阪地下鉄大正延伸工区での上圧シールド掘削土は、メタンガス対策として発生土を坑内で大気に曝すことを避けるため塑性流動化状態で配管内をポンプ圧送して排出した。この含水比の高い発生土の有効利用の試みとして、地下鉄駅舎部開削工事での狭隘な閉所空間における山砂の埋戻し・振動締固めなどを不要とすることによる安全性の向上や、沈下量の少ない均質な人工地盤の効率的な構築を目的に、前章でのべたReSM工法により約20,000m³を超える埋戻しを行った。

ReSM工法は、残土利用工法として国土交通省などが研究・開発を行っている流動化処理工法の一つに分類されるが、第2章2.2.3でも述べたように、粘土魂を粉砕するようにドラムを改造したミキサー車に発生土を土砂ホッパーから直接積み込むため、

- ① これまでの定置型プラントによる流動化処理工法のようなストックヤードや特別な解泥プラントを必要としない、という都市土木に適したシステムであること
 - ② 自らの工事における掘削土を利用するため発生源を特定できない残土が混入することがなく、効果的な品質管理が可能であること
 - ③ シールド発生土を利用できるため残土処分費低減につながること
- などの点が評価されて採用された。

本節では、1994年から1997年にかけて筆者が担当した大阪市交通局地下鉄7号線15工区～20工区において採用されたReSM工法について、その詳細を述べることにする。

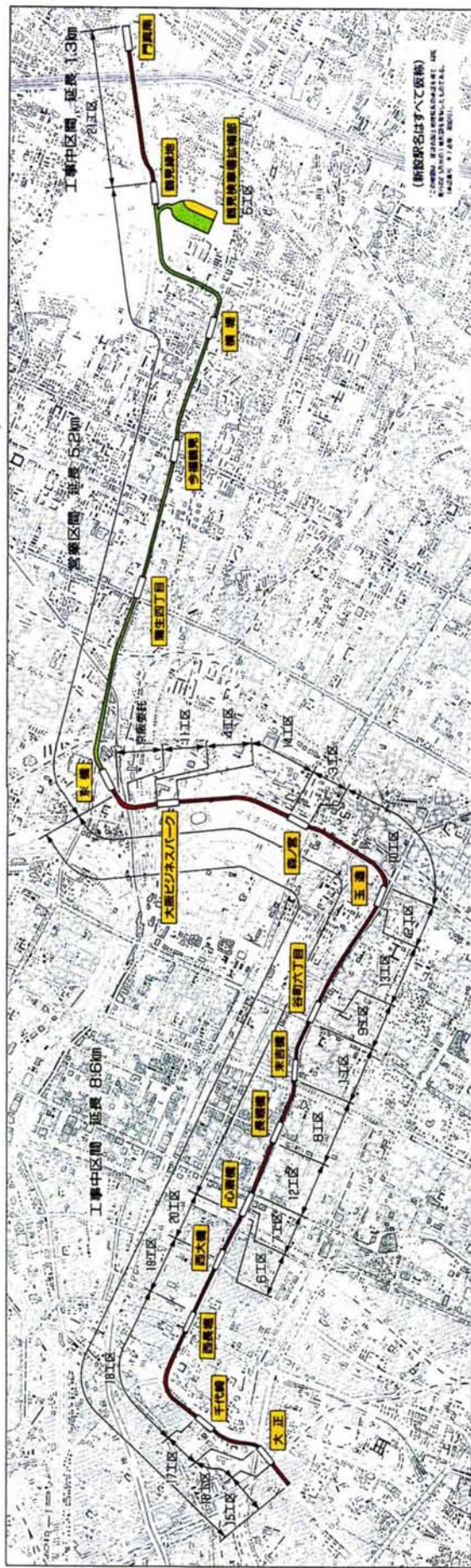
(1) 施工概要^{20), 21)}

大阪で7番目の路線である大阪市交通局地下鉄7号線は、図3-29に示すように全延長13.8kmで、このうち門真南～京橋間5.2kmについては、平成2年の「大阪花の万国博覧会」に合わせて開通しており、残りの京橋～大正までの8.6kmの延伸工事が平成6年の「なみはや国体」に焦点を当てて着手されていた。

この延伸区間のうち、ここで述べるReSM工法による残土有効利用に関係したのは、心斎橋～大正間（15工区～20工区）で、大阪市交通局建設技術本部心斎橋建設事務所西長堀支所がその工事管理にあたっていた区間である。これらの区間のシールド通過深さは、図3-29の縦断図に示すように、大部分が沖積粘性土層に位置している。今回の埋戻しに、ReSM工法によるソイルモルタルを使用した工区は15～20工区の全工区で、約1年にわたる月別の打設量は、表3-9に示す通りであるが、総計22,642m³に及んでいる。一方、埋戻しに使用したシールド発生土の搬出は、シールド区間をも担当する17～20工区であるが、埋戻し時期の終盤はシールド掘削が終了していたため、同表にも示したように一部出入口開削工事部の掘削土を搬入して使用したという経緯がある。

ここでは、このうち主としてシールド残土転用の20,287m³について述べることになるが、その工区間のやり取りを、表3-10に示している。

平面図



縦断面図 (今回工事中区間)

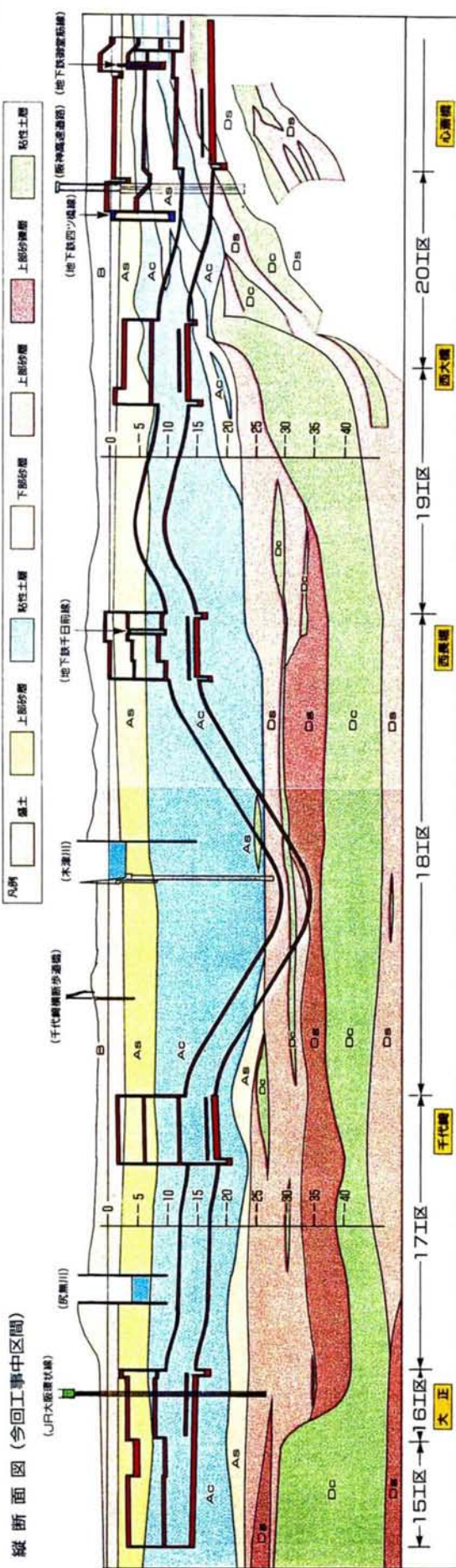


図3-29 大阪市地下鉄7号線 (15~20工区概要)

表 3 - 9 ReSM処理土の月別打設量

年 月	シールド発生土 打設量 (m ³)	搬入土打設量 (m ³)
95年10月	370.0	
11月	510.0	
12月	1305.0	
96年 1月	1412.5	
2月	3835.0	
3月	4335.0	
4月	3650.0	
5月	3019.5	
6月	1540.0	
7月	310.0	
8月		750.0
9月		110.0
10月		710.0
11月		785.0
合 計	20287.0	2355.0

注) 搬入土打設工区は18工区のみ

表 3 - 10 シールド掘削土のReSM工法流用量

工 区	シールド掘削 土量(m ³)	ReSMへの 使用量(m ³)	ReSM 打設量(m ³)
10			185.0
15(A)			4919.5
16(B)			1775.0
17(C)	20243.0	316.8	940.0
18(D)	41601.0	5676.3	2102.5
19(E)	20906.0	1987.8	4940.0
20(F)	14717.0	2209.2	5425.0
合 計	97467.0	10190.1	20287.0

注) 10工区は出入口部に試験的使用

(2) ソイルモルタルの配合と施工手順

前述したように、シールド掘削工区は17～20工区、埋め戻し工区は15～20工区である。これらの工区について、駅舎部の側部と頂部の埋め戻しをReSM工法によるソイルモルタルで行った。

それぞれの部位の最終目標強度を、試験施工での標準配合結果により表3-11のように設定したが、頂部については、将来の再掘削の可能性を前提に人力掘削が出来る強度の上限を 500kN/m^2 とし、それを超えないことが重要であり、一方、下限としては道路路床下の埋め戻し地盤の地耐力として 200kN/m^2 で十分安全であるという点から、目標値の範囲とした。これに対して側部では、埋め戻しに伴う切梁支保工の撤去に際し、土留壁を介在して伝達される土圧に対して十分な強度ならびに変形機能を有するという点から、安全率を見て 800kN/m^2 以上という値を設定した。

表 3 - 1 1 標準配合と目標強度

	セメント (kg)	水 (kg)	土砂 (m^3)	目 標 強 度
A	100	465	0.50	人力で再掘削可強度 $q_u = 200 \sim 500 \text{ kN/m}^2$
B	200	437	0.50	側部埋戻し洪積粘土程度 $q_u > 800 \text{ kN/m}^2$
C	300	437	0.47	

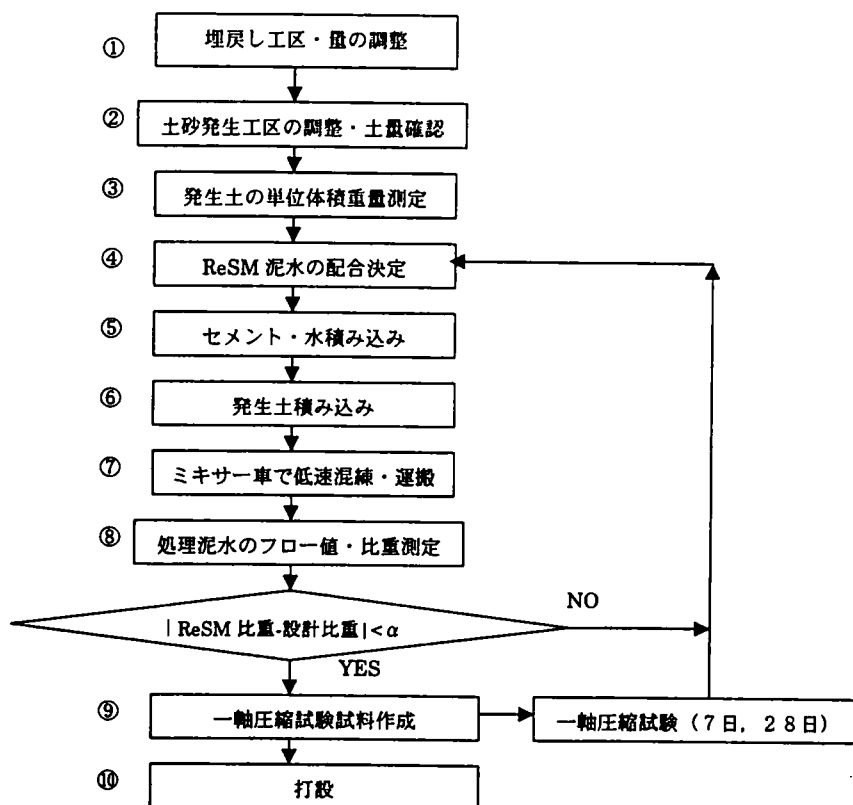


図 3 - 3 0 施工手順

このようにして設定した標準配合に対し、現場での配合および施工手順は図3-30に示す通りである。

図3-30の流れ図の番号に対応して、施工手順の主要な点については下記に示す通りである。

- ① 材料として使用する発生土の供給に制限を受けるので、埋戻し側の工程、埋戻し部位および数量等が、少なくとも週単位で把握されている必要がある。
- ② シールドの掘削状況と発生土の数量および推定単位体積重量（シールド自動計測システム）を確認して、標準配合表に基づき計算した必要発生土量を発生工区と調整する。
- ③ ソイルモルタル作成に先立って、発生土現物の単位体積重量を計量する。このとき、例えば16工区の間中部のように、シールド掘削土が砂・礫でほとんど占められる場合には、4工区の中でさらに良質な発生土が得られる工区と調整することも必要となる。
- ④ 作業開始前に標準配合に従って配合した高流動化処理土（ReSM）のブリージングの有無、プレパクトフローコーンによるフロー値、および泥水比重を測定した。ブリージングが約2%より大きい場合には土量の増加により、処理土の流動性が低い場合には加水量の増加により目標値を満たすように当日の基本配合を設定する。また、フロー値は10～20秒を目標とした。

試験配合でのセメント量 $C(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、水量 $W(\text{kg}/\text{m}^3)$ のとき、ReSM 1m^3 当たりの発生土の体積量 $Y(\text{m}^3)$ は

$$Y = 1 - C/3150 - W/1000 \quad (3.3)$$

発生土単位体積重量を $X(\text{kg}/\text{m}^3)$ とすると、ReSMの設計泥水比重 γ_p は

$$\gamma_p = (C + W + X \cdot Y) / 1000 \quad (3.4)$$

として求めた。

- ⑤ 基本配合をもとに、水量とセメント量を計量しミキサー車に投入・攪拌して、セメントペーストを作成する。
- ⑥ 練りあがったセメントペーストを積んだミキサー車は発生土の供給工区へ行き、ミキサー車ドラム内で総量が 5m^3 になるまで土砂ホッパーから発生土をミキサー車に投入し、練り混ぜる。
- ⑦ 低速混練を行いながら埋戻し現場に向けて出荷する。埋戻し工区において3～5分間高速回転で攪拌した後、打設ポンプ用のホッパーに泥土状態のソイルモルタルをミキサー車から投入する。粘土塊が出た場合は随時高速攪拌を行い、ミキサー車内のビットおよびピアノ線で細粒化する。
- ⑧ この時1日2回の割合で単位体積重量を測定し、測定値が当日の基本配合の値より α 違った場合には（ここでは $0.05\text{g}/\text{cm}^3$ を設定）発生土の性状が変化している可能性があるため、配合試験により比重を調整して新しい配合を設定する。

⑨ 1工区当たりの日打設量が 50m^3 を越える場合には、一軸圧縮試験用試料を作成することを原則とし、養生日数7日および28日の一軸圧縮強さを測定する。

土質性状が大きく変わる場合には、1日の打設量が 50m^3 以下でも一軸圧縮試験用試料を作成する。

⑩ ホッパーから直接シュート方式、またはスクイズポンプを用いて圧送して埋め戻しに供する。

以上述べた手順の概略を、模式的に図3-31に示す。また、写真3-5(1)、(2)に、それらの施工手順の代表的な状況を示した。

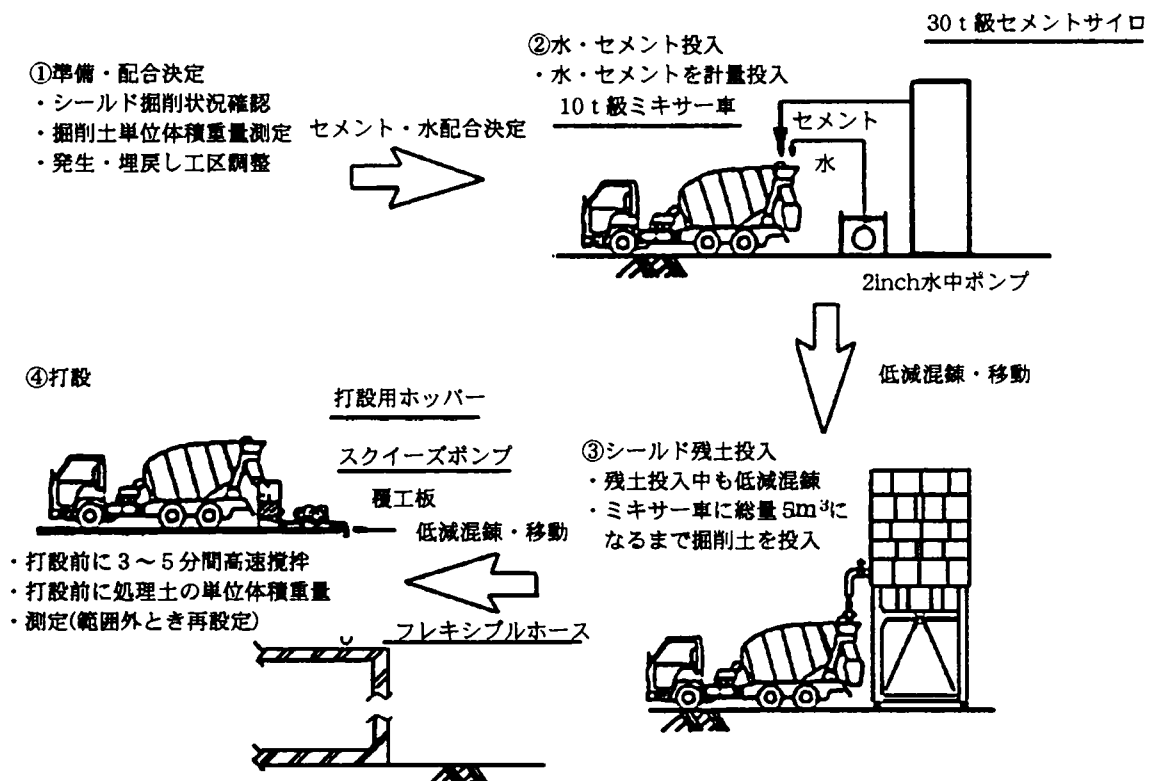
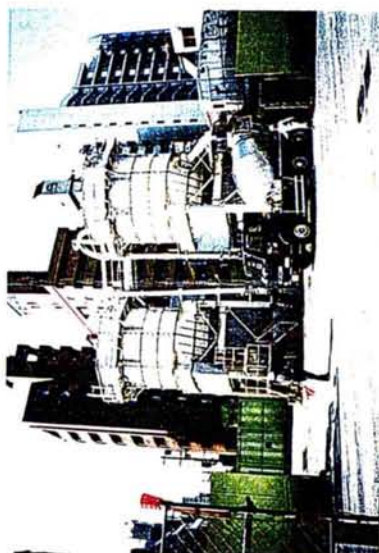


図3-31 シールド掘削土利用のReSM工法概要図



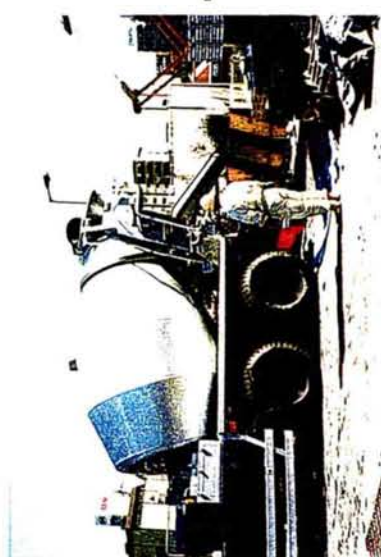
セメント積込



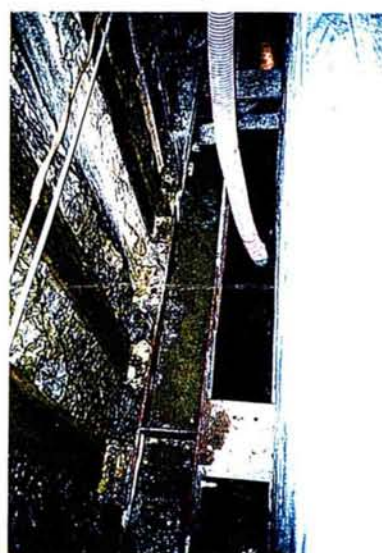
土砂積込



打設ポンプ



打設状況（投入）



打設状況（側部）

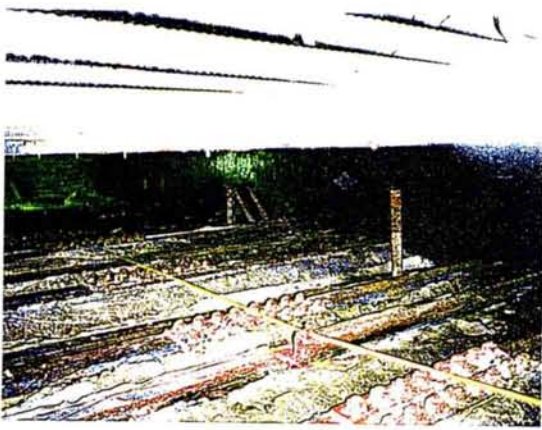


打設完了（頂部）

写真 3-5 (1) 施工概要写真



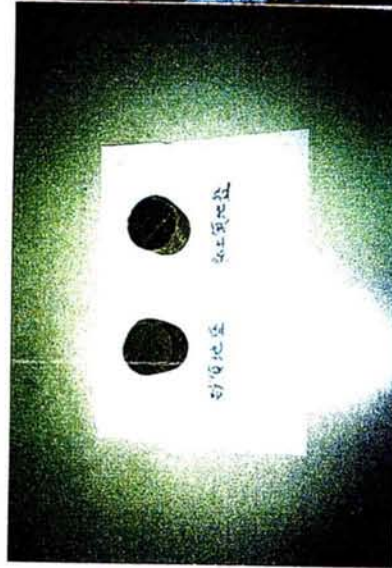
比重測定



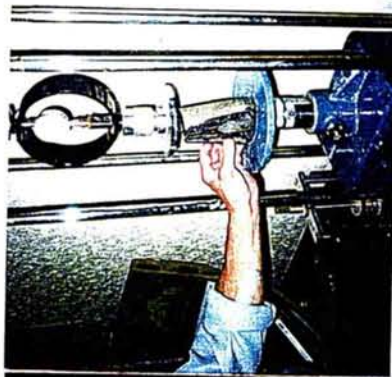
打設（構造物側部埋め戻し状況）



型枠脱型（RES固化状況）



一軸圧縮試験（地山の土質とRES固化上がり状況）



（一軸試験状況）

写真3-5(2) 品質管理概要写真

3.4.2 シールド残土によるソイルモルタル埋戻し結果

(1) シールド通過地層と発生土の関係

シールド掘削工区においてシールドが通過する地層を表3-12に、またそのそれぞれの地層の物理特性を表3-13に示す。このうち17工区の地盤は、部分的には砂を20～30％程度含む箇所があるが、そのほとんどは細粒分が約90％を占める均質な沖積粘土層であるのに対して、18,19,20工区では沖積粘土層から沖積砂層、洪積層までの広範囲な土質分布を示す。特に18工区では沖積粘土層から洪積砂礫層までを、また、20工区では粘土層と砂層が複雑に重複した地盤を通過する。沖積粘土層と洪積粘土層からの発生土は、砂・礫分を多く含む箇所が一部あるものの全体としては細粒分が主体であり、ソイルモルタルとしてのブリージングも少ないため安定した強度の埋戻し土を構築できることから、高流動化処理土として適した土質である。一方、沖積砂層、洪積砂層および洪積砂礫層からの発生土は、砂・礫分が主体であり、ブリージングが大きくかつ処理土の強度にバラツキが生じやすい発生土である。

表 3 - 1 2 シールド工区と対象地盤

工 区	シールド通過地層
17	A c
18	A c, A s, D s, D c, D g
19	A s, A c
20	A c, A s, D s

3 - 1 3 掘削工区の地盤物性

地層	N値	土粒子密度 (g/cm ³)	自然含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	粒度組成 (%)			
					礫分	砂分	シルト分	粘土分
As1	0～60	2.505 ～2.743	9.1 ～69.6	1.876	0～70	0～94	3～70	3～43
Ac	1～20	2.582 ～2.670	17.3 ～60.2	1.636 ～1.909	0～7	0～59	32～72	21～55
As2	5～45	2.637 ～2.670	15.5 ～30.7	(1.800)	0～15	36～86	4～38	4～26
Dc	3～60	2.607 ～2.667	21.5 ～76.9	1.537 ～1.876	0～34	0～79	8～70	11～63
Ds	10～60	2.626 ～2.679	11.1 ～36.5	1.919	0～17	30～89	4～34	4～39
Dg	20～60	2.637 ～2.656	5.3～ 10.7	(2.000)～	40～69	27～51	4～11	

しかし、今回は埋戻し工区とのタイミングもあり、表3-12にも示したように18工区や20工区の砂層および砂礫層を含む地層からの発生土も対象としなければならないため、ポンプ打設が困難な巨礫を含んでいるDg層以外からの発生土はすべて用いることとし、配合試験を行いブリージングの有無や強度などを確認しつつ施工を行った。

毎日の配合設定に際して計量された工区別発生土の単位体積重量の経時変化を図3-32に示す。これによると、とくに18(D)、20(F)工区について発生土の単位体積重量は $1.4 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ の範囲で大きく変動しているが、先述のようにこの2つの工区は、沖積粘土層だけでなく洪積砂層、洪積粘土層などの地層を掘削しているため、発生土の土質性状の変化が著しく単位体積重量もバラツキが大きい。これに対し、主として沖積粘土層を掘削した17(C)、19(E)工区の発生土の単位体積重量は $1.5 \sim 1.65 \text{ g/cm}^3$ と比較的安定している。

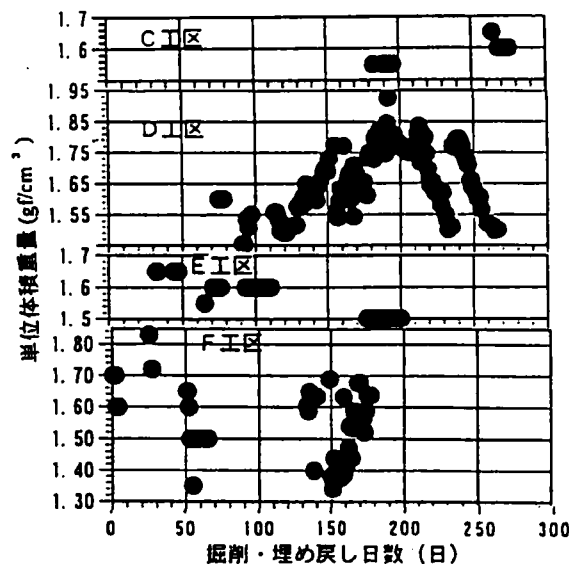


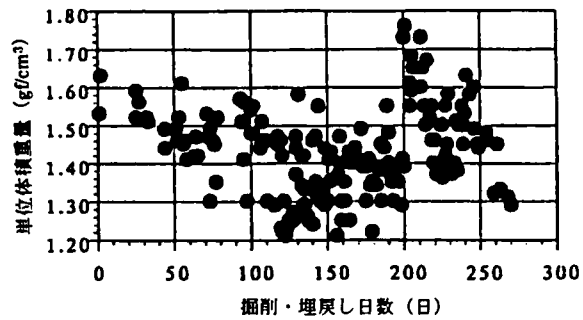
図3-32 工区別の発生土単位体積重量の変化

(2) ReSMソイルモルタルの物理特性

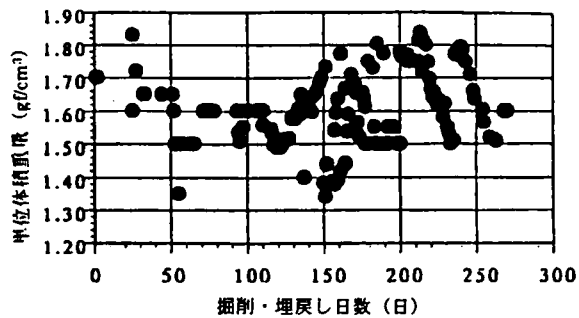
第1章でも述べたように、大型プラントを用いた流動化処理土工法での発生土の利用効率（処理土 1m^3 あたりに用いられる発生土の率）は、発生土の粒度や含水比により異なるが、一般に体積比率で0.7程度を目安にすることが多いのに対し、ReSM工法では高含水の発生土の利用効率を従来工法より10～30%程度低い0.45～0.6に設定している。このように発生土の利用効率を低くすることで、

- ① 特別なプラントではなく市販のコンクリートミキサー車により混練できる
 - ② 高流動性であるため効率的かつ均質な埋戻し・充填工が可能となる
- など施工性のメリットが生じる。

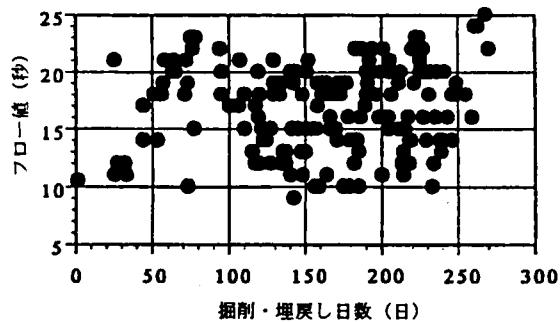
発生土の単位体積重量（図3-32に示す各工区の数値を同一図としてまとめたもの）、ReSM処理土の単位体積重量およびフロー値（秒）の経時変化図を図3-33(1)～(3)に示しているが、図より発生土の単位体積重量のばらつきに従って処理土の単位体積重量も変動していることがわかる。この時、フロー値は目標とした10～25秒の間を保持している。



(1) 発生土の単位体積重量の経時変化図



(2) ReSM処理土の単位体積重量の経時変化



(3) フロー値（秒）の経時変化図

図3-33 ReSMソイルモルタル物理特性の経時変化

以下、これらのデータをいくつかの切り口で整理し、ReSM工法によるソイルモルタル（処理土）の物理特性について考察しておきたい。

(a) 単位体積重量と物理特性との関係

図3-34は、発生土の単位体積重量とそれに対応するソイルモルタルの単位体積重量との関係を示したものである。その両者の間には正の関係が見られるが、側部でのセメント量が多いため、同じ発生土を用いても、処理土の単位体積重量は側部の方が頂部に比べて 0.2g/cm^3 程度大きな値が得られている。

また、図3-35に示したソイルモルタルの単位体積重量とフロー値の関係からは、頂部については正の相関関係がわずかにあるが、側部については認められない。

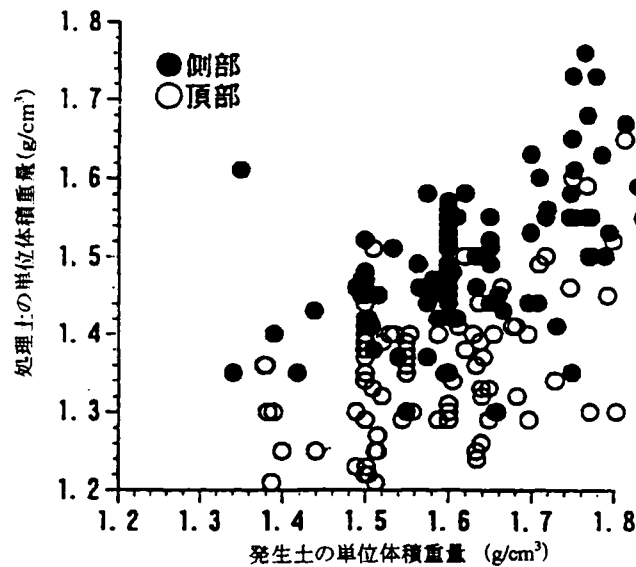


図 3 - 3 4 発生土と処理土の単位体積重量の関係

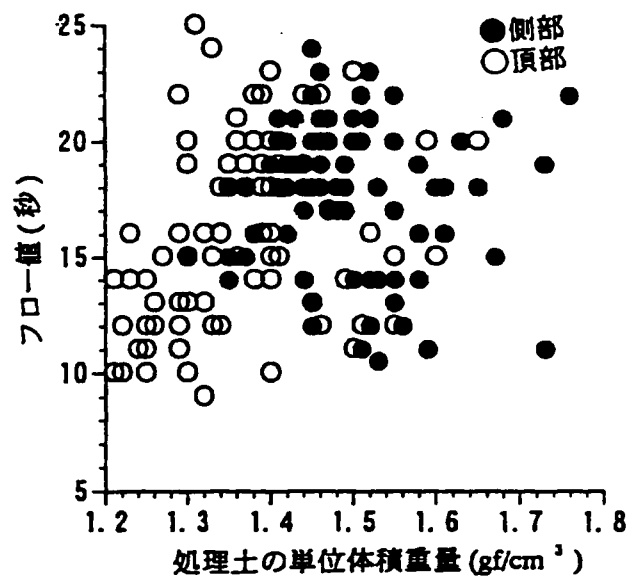


図 3 - 3 5 処理土の単位体積重量とフロー値の関係

(b) 配合と物理特性との関係

図3-36(1), (2)には発生土利用率などとフロー値と加水量およびフロー値の関係を整理している。フロー値を一定範囲内に保つためには加水量を調整する必要があるが、フロー値は発生土の粘性土含有率と加水量との関係により支配されるため、粘性土含有率の大きい場合には発生土の利用度を小さくし、その分加水量を増加させることになる

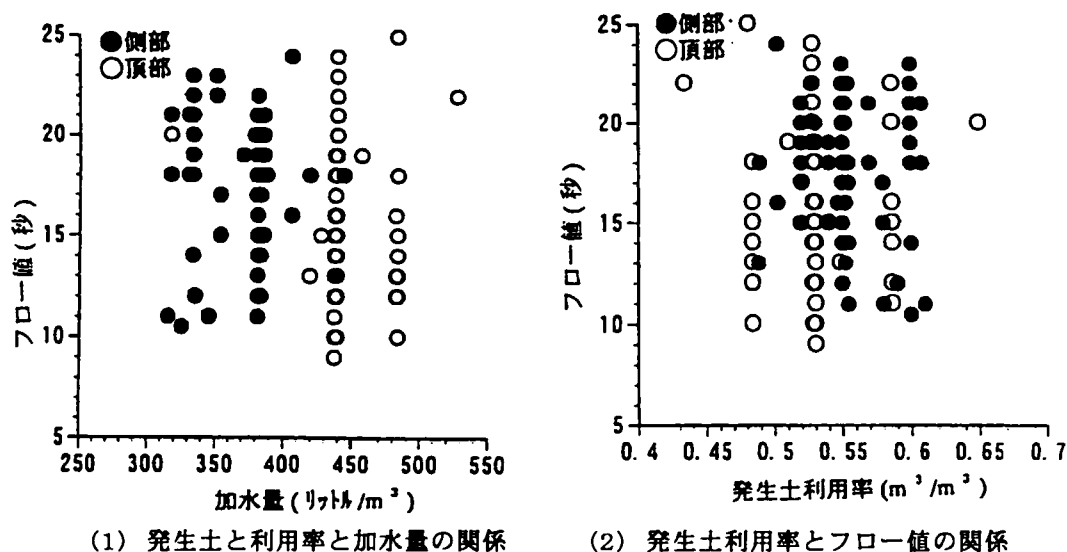


図3-36 加水量、フロー値および発生土利用率の相関

(3) 力学（強度）特性

(a) 目標強度との関係

原則として $50\text{m}^3/\text{日}$ を超える打設量に対して行った強度試験の結果、養生日数28日におけるReSMソイルモルタルの一軸圧縮強さの頻度分布を図3-37に示す。これによると、頂部と比較して強度の大きい側部では多少相関のバラツキは大きくなるが、頂部では $100 \sim 400\text{kN/m}^2$ 、側部では $500 \sim 1500\text{kN/m}^2$ の範囲にあり、ほぼ良好な分布関係にあることがわかる。側部、頂部とも28日強度では、目標強度より若干低い強度のものが多いが、目標強度範囲とはわずかな差であり、第2章表2-16にも示したように90日養生では28日のほぼ1.4倍にまで強度が増加することが分かっていることから、目標強度を満たすと考えられる。またこのことは、打接後時間が経過して採取した不攪乱試料の一軸圧縮強さから、最終強度は目標強度範囲内にあることが証明されている。

図3-38(1), (2)には、頂部および側部打設ソイルモルタルの7日強度と28日強度との関係を示しているが、頂部、側部とも良好な比例関係が得られているのがわかる。このことから、3日強度を含め初期強度の品質管理により、28日強度もしくは目標強度の管理を行うことの妥当性を見ることが出来る。

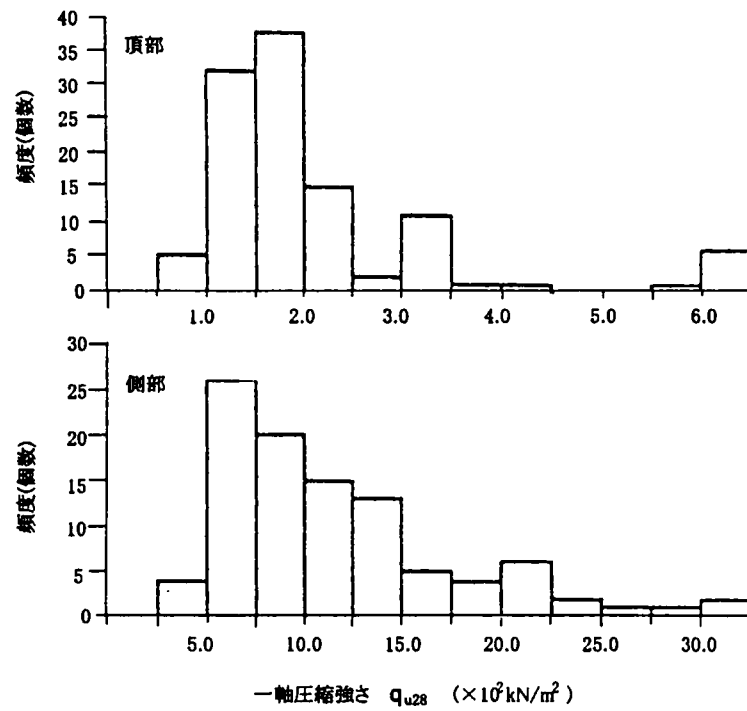


図 3 - 3 7 一軸圧縮強さ(28日)の分布

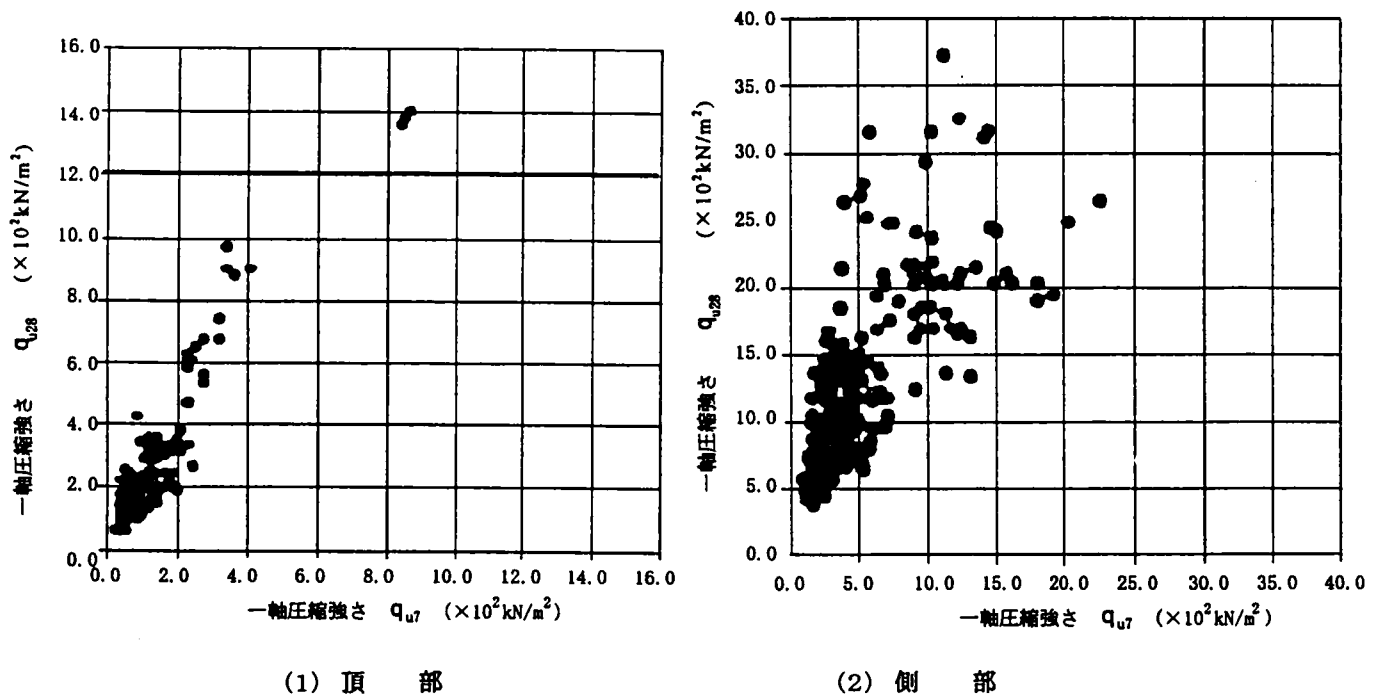


図 3 - 3 8 7日強度と28日強度の関係

(b) 発生土利用と強度との関係

図3-39(a)~(d)に、一軸圧縮強さ(28日)と発生土および処理土の単位体積重量、発生土の利用率、さらには加水量といった様々なパラメーターとの関係を整理してみた。これらをベースにして、それぞれのもつ傾向は以下の通りである。

- ① 発生土の単位体積重量と一軸圧縮強さの関係より、頂部では、発生土の単位体積重量の変化に係わらず一軸圧縮強さは一定の範囲にあるものの、側部では単位体積重量が大きくなると一軸圧縮強さのバラツキも大きくなる傾向が見られる。
- ② また、処理土の単位体積重量との関係では、同図(b)に示すように、側部について単位体積重量が大きくなるほど一軸圧縮強さが大きくなる傾向が見られる。

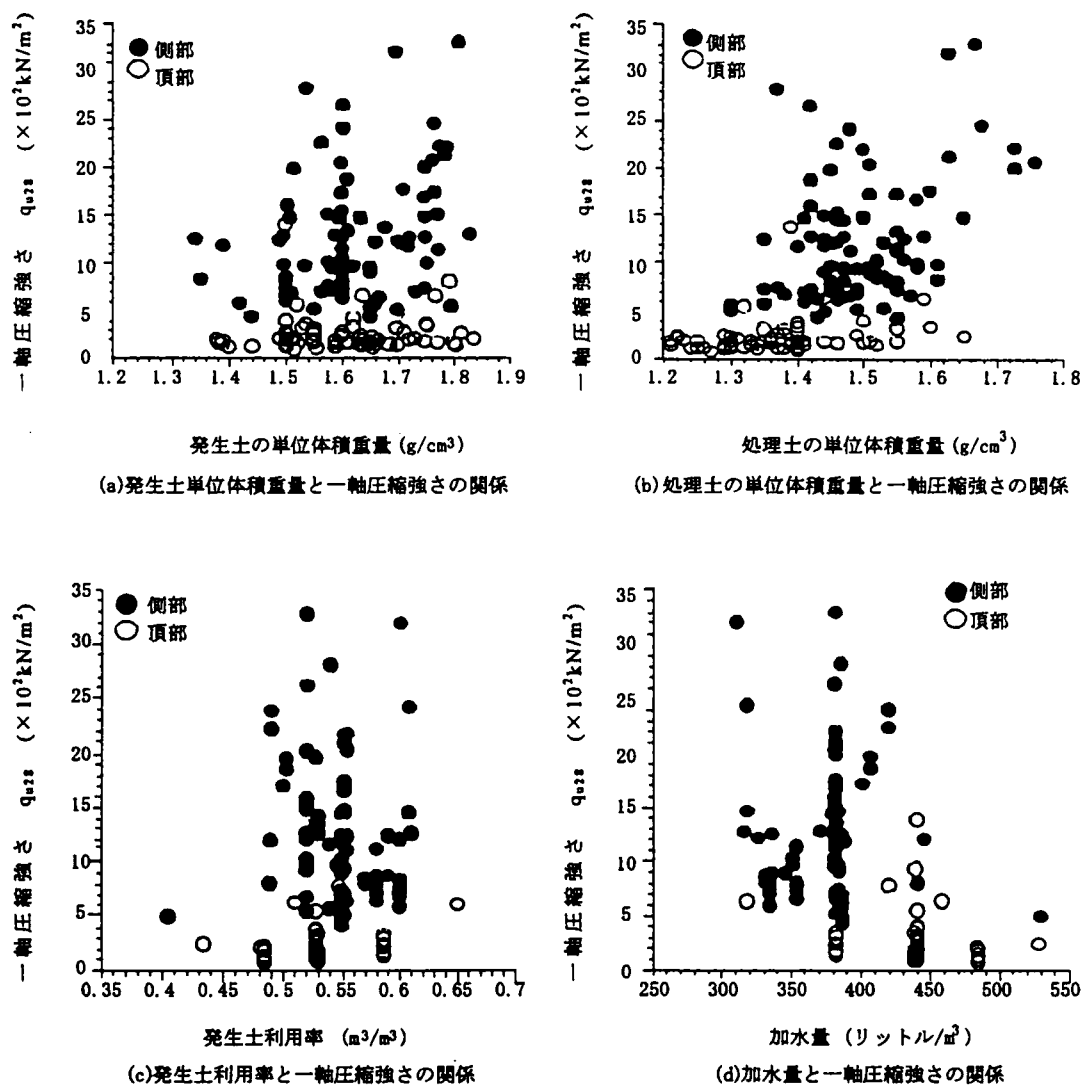


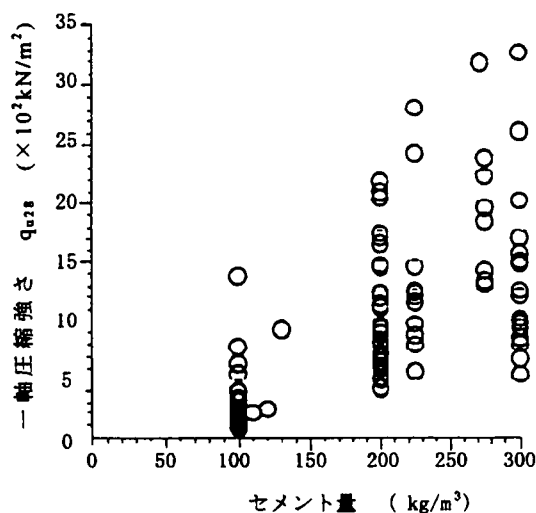
図 3 - 3 9 各種パラメーターと強度の関係

- ③ 同図(c)に示した発生土利用率と一軸圧縮強さの関係については、側部ではバラツキが大きく発生土利用率との関係は明確ではないが、頂部では発生土利用率が大きくなるに従い一軸圧縮強さがわずかに大きくなる傾向が見られる。
- ④ また、加水量と一軸圧縮強さの関係を同図(d)に示すが、頂部、側部共に加水量が少ないほど一軸圧縮強さが大きくなる傾向が見られるが、とくに側部についてはバラツキが大きい。

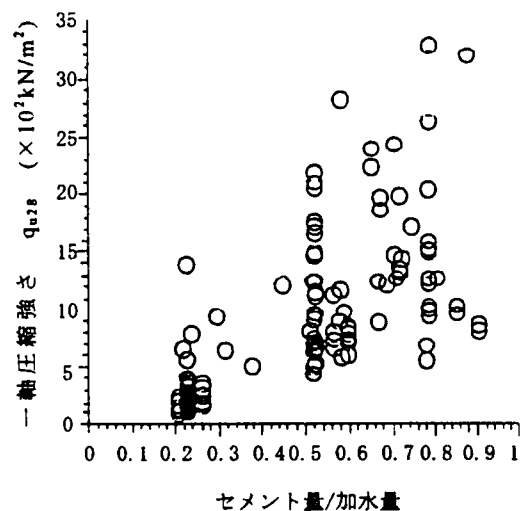
以上のように、セメントを除く各種パラメーターと強度の関係はバラツキが大きく必ずしも明確ではないが、これは流動性（フロー値）や分離性（ブリージング率）といった施工管理上の要因をまず設定し、この結果としての加水量等の変動に対してセメント量を調整し、目標強度を求めたことを反映している。

(c) セメント量と強度との関係

図3-40(a)からセメント量と一軸圧縮強さの間には相関関係が得られる。セメント量が多い場合は強度のバラツキも大きくなる傾向があるが、頂部においてはセメント量が約 100kg/m^3 の配合の場合、一軸圧縮強さは $100\sim 500\text{ kN/m}^2$ の、また側部においてはセメント量 $200\sim 300\text{kg/m}^3$ の範囲で、 $500\sim 3000\text{ kN/m}^2$ の範囲にあることがわかる。このことから、ReSMモルタルのような高流動化処理土の強度に大きな影響を与えるのは、当然のことともいえるが、セメント量であり、発生土利用率、加水量およびセメント量の比率を適切に決めれば、発生土の物理特性のバラツキにも係わらず今回設定した目標強度を満足する処理土を構築できたことが理解されよう。



(a) セメント量と一軸圧縮強さの関係



(b) セメント量/加水量と一軸圧縮強さの関係

4-40 セメント量と強度の関係

この場合定量的には、加水量（W）に対するセメント量（C）の比率（C/W）、土量（S）に対するセメント量の比率（C/(C+S)）などが相関しているであろうが、今回は土砂の掘削とほぼ同時にReSM工法で処理したため、発生土の含水比を測定する時間的余裕がなく、発生土中の水量を求めることができなかった。図4-40(b)において、セメント量／加水量と強度との関係を整理してみたが、同図におけるセメント量との関係とあまり変わらない相関係が得られることがわかる。

このような現象をベースに、発生土の単位体積重量が大きいほど（ 1.80g/cm^3 ）砂分が多く、含水比は小さくなり（20%）、逆に単位体積重量が小さいほど（ 1.40g/cm^3 ）粘土分が多く、含水比は大きくなる（120%）と仮定して、この間を直線補間して発生土の単位体積重量と含水比の関係式を想定し求めた発生土中の含水量を加味して、想定水量（W）に対するセメント量（C）の比率をベースにデータ整理したものが、図3-41である。図3-40(1), (2)に比べ、一軸圧縮強度との相関関係が明確に出る傾向が見られる。このことからReSM工法のような高流動化処理土では、配合比率が大きく変わらない限り今回の目標強度の範囲内で強度管理が出来ているが、今後発生土の含水比を現場で簡単に測定することが出来るようになれば、処理土の水量に応じたセメント量の配合が可能となり、さらに処理土の施工品質を改善することができると考えられる。

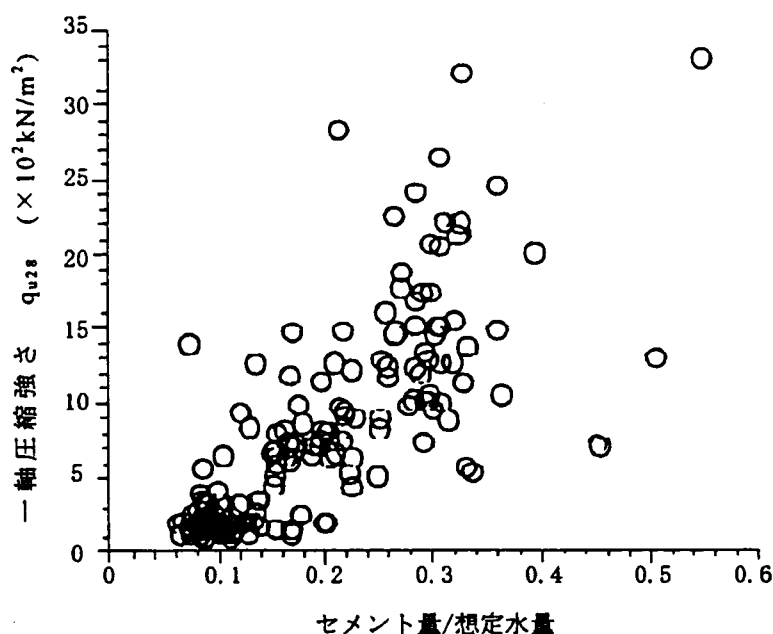
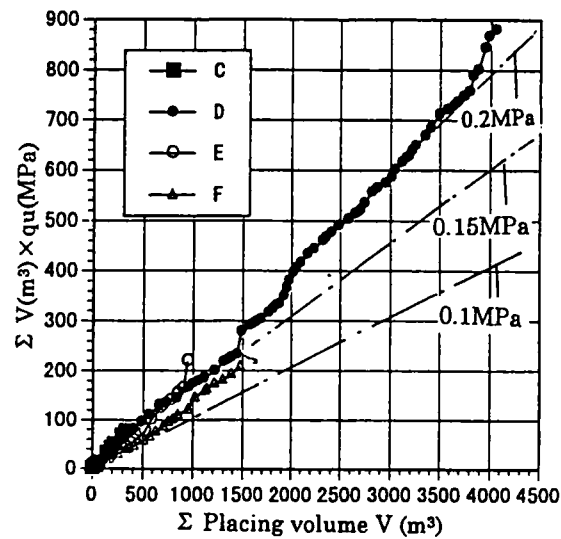


図3-41 セメント量／想定水量と強度の関係

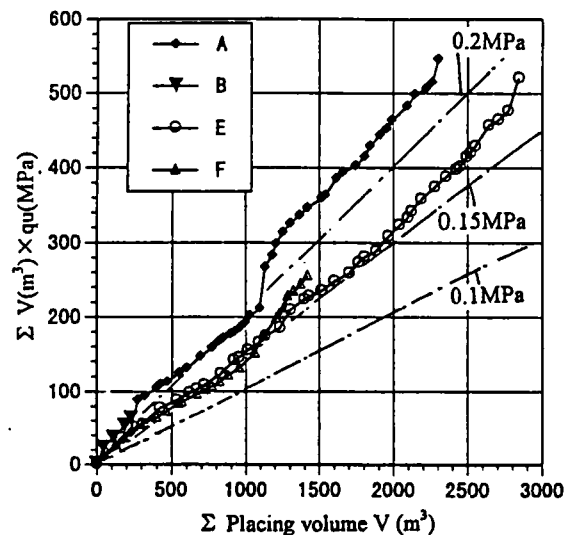
3. 4. 3 ソイルモルタルの埋戻し土としての妥当性

(1) 累積値管理

打設後の埋め戻し対象全体としての施工品質を評価する試みとして、[打設量]の累積値と[打設量]×[一軸圧縮強さ]（養生日数 28 日）の累積値とを対応させた強度管理の考え方を導入してみた。図3-42(a), (b)に頂部の、図3-43に側部のそれぞれ整理結果を示している。図では傾きが強度に相当し、毎日の打設量が同じであるならば曲線の傾きは埋め戻し地盤の平均強度を表すことになる。



(a) 発生工区別の強度管理



(b) 埋戻し工区別の強度管理

図3-42 ReSMソイルモルタル強度の累計値管理図（頂部）

このうち頂部については、図3-42の(1)発生工区、(2)埋戻し工区別に強度を測定した時のそれぞれ強度管理図より、頂部では発生工区全体としての曲線の傾きは約0.2Mp(200kN/m²)であり、埋戻し工区別でも、後述のように埋設物の受け防護機能を兼ね持たせた15工区で約100m³の打設量について大きな強度を示すものの、全体として0.2Mp(200kN/m²)の線に沿った強度管理がなされていることがわかる。

また側部でも、図3-43の埋戻し工区についての強度管理図より、一軸圧縮強度はほぼ0.8～1.5Mp(800～1500 kN/m²)の範囲内にあり、工区による強度の違いはほとんどなく適切に目標値 800 kN/m²以上が管理されていたと言える。

いずれにしても、例えばコンクリート等構造部材としての強度に関する品質管理とは異なり、全体をマスとしてとらえる埋戻し等の品質管理として、上述のような累計値管理は新しい試みとして注目すべき視点といえよう。この点については、第4章のソイルモルタルマネジメントシステムに関連して改めて触れたい。

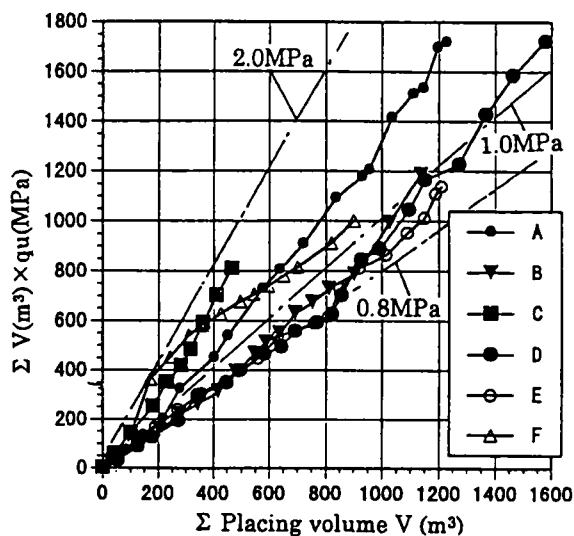


図3-43 ReSMソイルモルタル強度の累計値管理図(側部)

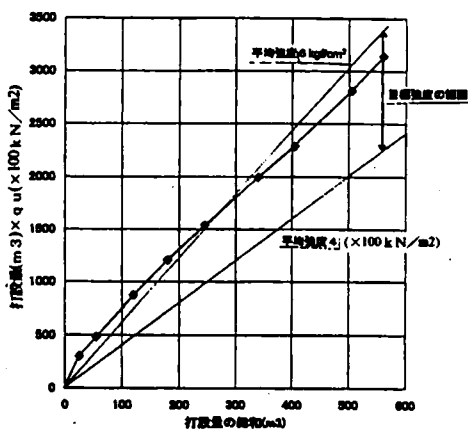


図3-44 タンク基礎埋戻し工事における強度管理図

図3-44は、筆者らが関係したタンク基礎の埋戻し工事(施工量 580m³)にReSM工法を採用した場合の強度管理図であるが、上記の累積値管理の例を見ることができる。

(2) 埋戻し後の施工品質確認結果

(a) 頂部

頂部について、打設後 2～数ヶ月後にブロックサンプリングまたはコアカッターにより不攪乱試料を採取し、一軸圧縮強さを測定した。

表3-14より、採取したサンプルの一軸圧縮強さは、ほぼ 200～500 kN/m² の目標強度の範囲にあるが、打設時に採取した試料の 28 日強度より若干大きな値が得られている。この打設時の試料の 28 日強度に比べて不攪乱試料の強度が大きいのは、これまでも述べてきたように養生期間が長かったためであると考えられる。また、20 工区“3 上”地点の一軸圧縮強さが、800 kN/m² と大きな値を示しているが、これ 18 工区の砂分の多い発生土を用いて 20 工区で最後に打設した箇所であり、図3-42(a)のうち 18(D)工区の管理図の傾きが急激に大きくなっている地点に相当する。この結果より、ごく一部のわずかな箇所を除いて目標強度の範囲内にあり、人力による再掘削を行う際にはほとんど問題がないと言える。また、打設地点・深さの違いによる差はほとんど見られないことがわかる。

表 3 - 1 4 不攪乱試料の一軸圧縮強さ

工区	採取地点	湿潤密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強さ (kN/m ²)
15	1 上	1.380～1.381	228～284
	1 下	1.428	283
	2 上	1.507～1.515	291～313
	2 下	1.417～1.432	220～214
	3 上	1.459	196～240
20	1 上	1.439～1.440	298～447
	1 下	1.429～1.442	351～436
	2 上	1.342～1.365	341～365
	2 中	1.490～1.523	440～446
	2 下	1.371～1.388	380～383
	3 上	1.340～1.346	790～842
	3 中	1.340～1.357	252～265
	3 下	1.443～1.446	225～289

(b) 側部

側部についても、20 工区で標準貫入試験およびコア採取試料による一軸圧縮試験を行った。図3-45および表3-15にその結果を示す。

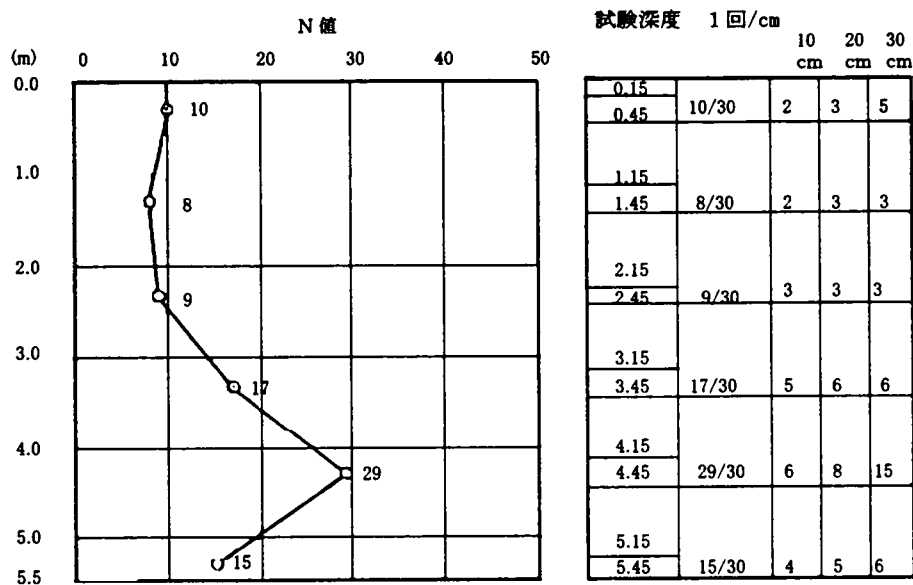


図 3-45 側部埋戻し部の標準貫入試験結果(20工区)

表 3-15 側部埋め戻し部コア採取による一軸圧縮試験結果 (20工区)

孔 番	採取深度 (G L -)	一軸圧縮強度 (kN/m ²)	湿潤密度 (g /cm ³)
N-1	1.02 ~ 1.13	512	1.414
	2.19 ~ 2.30	535	1.425
	3.20 ~ 3.31	435	1.454
	4.30 ~ 4.41	1340	1.460
	5.38 ~ 5.47	535	1.493
S-1	1.14 ~ 1.26	800	1.475
	2.32 ~ 2.42	510	1.464
	3.02 ~ 3.13	700	1.437
	4.33 ~ 4.44	805	1.440
	5.13 ~ 5.24	930	1.534

側部の場合は、切梁支保工撤去との兼ね合いで埋め戻しするため、ソイルモルタルの打設時期は長期にわたるのが通常である。今回の施工結果確認試験箇所についても、下部では打設後約1ヶ月を経ており、一方、上部は打設後8日ということになる。

したがって、下部の値が最終的な強度に近いものとなるが、N-1ではばらつきも大きく、一部目標値に満たないものもある。ただ、埋め戻されたソイルモルタルはマスとして機能するため、ある層厚についての平均値として調整、評価することが重要となろう。

(3) 搬入土によるReSM処理土

これまで述べてきたように、ReSM処理土の材料は土圧シールドの掘削土を用いたが、シールド掘削完了後のReSMの材料として他の沖積層の掘削土も試験的に使用し、同一工法による埋戻し工の実施により均質な土構造物の構築を目指すとともに、他の掘削土への適用性も検討した。

掘削土はダンプトラックにより搬入したものを、バックホウにより小型ホッパーを通してセメント・水を搭載したミキサー車に投入した。配合設計、施工管理方法はシールド掘削土を用いたReSM工法と同じである。

その結果は、シールド掘削土を用いた場合の関係とほぼ同じであり、例えば図3-46に示すように、28日強度の頻度分布について、頂部、側部とも目標強度を満たしていることがわかる。また、図3-47に示した7日強度と28日強度との間には、これまでと同様 $\sigma_{28} \approx 1.5\sigma_7$ の関係があることが知られる。

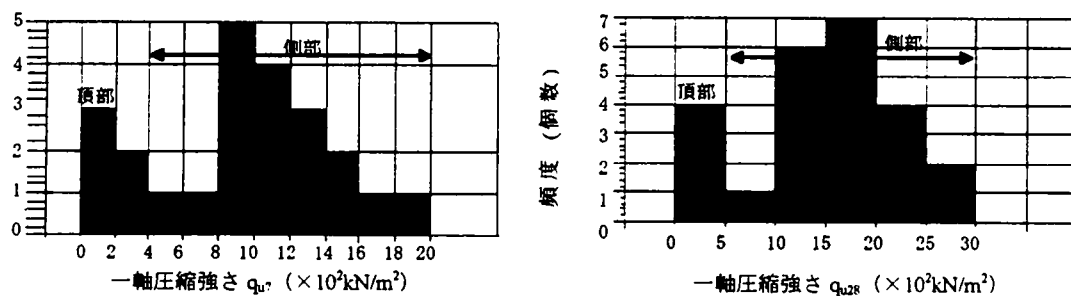


図3-46 搬入土ReSM処理の一軸圧縮強さの分布

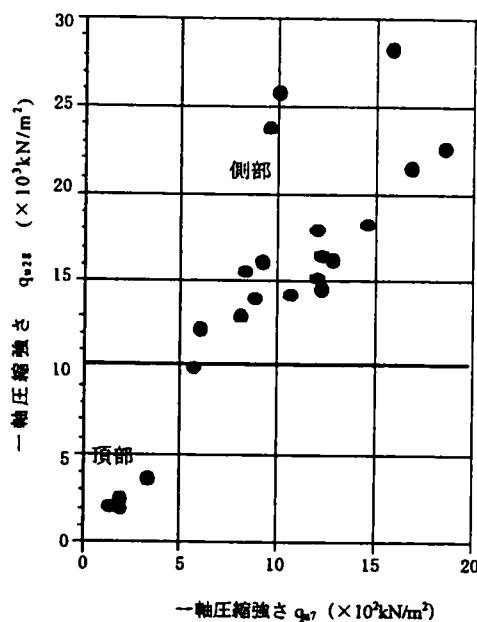


図3-47 搬入土ReSM処理の養生日数7日、28日の一軸圧縮強さ関係

とくに図表等で整理していないが、発生土利用率と加水量の関係、セメント量と一軸圧縮強さの関係も、シールド掘削土を用いた場合の関係とほぼ同じであり、掘削土の性状の違いにも係わらず、ReSM工法による埋め戻し土の施工管理できることがわかった。

このことは、発生土の有効利用が持つ需給バランスという課題に対しての柔軟性もしくは補完性という意味で重要である。

（４）成果と今後の課題

（a）人工地盤としての成果

i) 頂部埋戻し

泥土化したシールド発生土をReSM工法により有効利用することにより、頂部では沈下量の小さい均質な人工地盤を効率的に構築することができた。とくに鋼材や木材による埋設物の受け防護部については、それらの部材が輻輳しており締固めが十分できないこともあって、後日地下水等によりその部分の空洞が拡大し路面陥没に至る例がこれまでも多くみられた。これに対し、今回のReSMソイルモルタル利用の利点を生かし、埋設物そのものをソイルモルタルそのもので受けることや、複雑な構造の受け防護部分をそれで充填することによりその懸念を払拭することができた。GL-2.1mより上部の埋め戻しは山砂等によることとして道路管理者との協定がなされているが、多くの埋設物はその範囲に設置されているため、試験工区について道路管理者および埋設物所有者と協議し、将来の障害とならない等その妥当性を確認している。

ii) 側部埋戻し

側部では地下鉄駅構造物と土留め壁間の狭隘な閉所空間での山砂のまき出しや振動締固めなどを不要とすることによる、とくに安全性の面で優れた施工性を有するが、土留め壁と構造物との間に隙間なく充填されるため、切梁支保工撤去時の土圧の伝達が面として行われることになる効果も特筆すべき点である。

従来の木製太鼓梁や鋼材による盛換えでは、土留杭ごとに集中荷重として伝播されるため、土留壁のさらなる変位に対する制御が困難であるとの問題があった。図3-48は、18工区における掘削完了時点と埋戻し完了時点での土留杭変位の測定事例を示すが、埋戻しに伴う切梁支保工撤去による杭の変位は、掘削に伴う変位の1/4程度と小さい¹⁹⁾。本章3.2.3で紹介した地下鉄2号線大日停留場建設における開削工事でも、掘削の大部分が沖積粘土層で類似した土質条件であったが、この場合は木製太鼓梁を用いた盛換えによる切梁支保工撤去で、土留杭の変位は撤去時の方がむしろ大きい値を示していたという実績と比較してもその成果が評価されるところである。

（b）今後の課題

本節で述べてきたように、ReSMソイルモルタルによる掘削土有効利用の埋戻し工法は、多くの点で優れた成果を示したが、さらなる普及のために解決すべき下記のようないくつかの課題を残している。

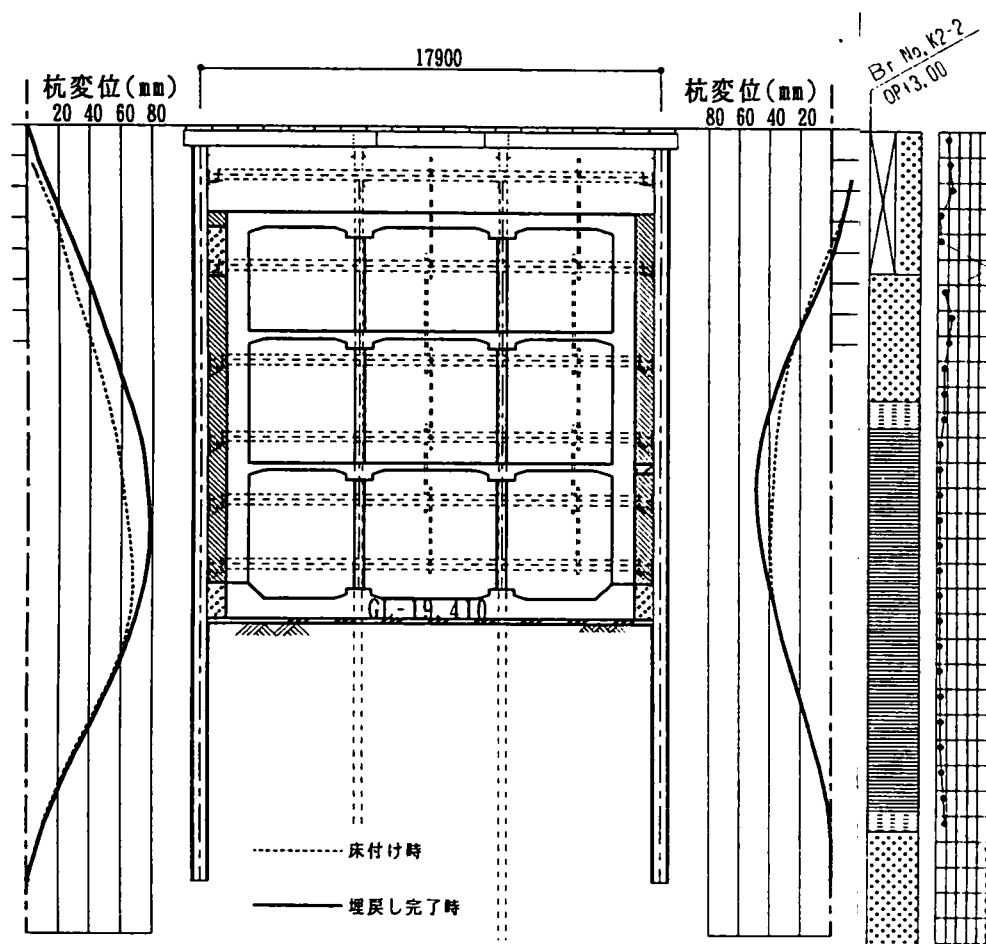


図3-48 掘削および埋め戻しに伴う土留め壁の変形挙動¹⁹⁾

- ① 施工効率改善のための情報管理体制の確立
- ② 処理土中に粘土塊が残る場合の装置改善
- ③ 騒音・処理土飛散・洗車水飛散などの環境対策
- ④ ミキサー積載量・打設量の定量的管理方法の改善
- ⑤ 交通渋滞対策

また、搬入土の場合、玉石やコンクリートガラ等異物を除去しなければならず、施工性が悪くなるという課題が残ったが、建設発生土を排出する現場がそれらの対応策を含め製品としてソイルモルタルを出荷するという、発想の転換が必要となろう。

一方、強度面での品質管理的には、セメント量(C)/想定水量(W)と一軸圧縮強度の間には明確な相関関係が見られることから、今後発生土の含水比を現場で簡単に測定することが出来るようになれば、発生土の水量に応じた加水量やセメント量の配合調整が高い頻度で可能となり、さらにReSM工法の施工品質を改善することができると考えられる。

3. 5 ReSM工法によるトンネル空洞充填工事

前節ではReSMソイルモルタル技術開発に関連して、大阪地下鉄工事での施工例について詳述してきた。本節では、その成果が大規模に適用されたその後の事例として、地下トンネル空洞の埋戻しについて紹介する。

(1) 工事概要

(a) 現場概要

京都市民の水瓶「琵琶湖」から京都市内へ導水する琵琶湖第二疏水トンネル（本坑延長4,056m）の完成に伴い、その作業坑、水平坑および斜坑の埋戻し工法としてReSM工法が採用された。

その埋戻しの対象となった作業坑、水平坑および斜坑部の断面・平面概略図を図3-49に示す。斜坑は水平距離400mで入り口部と100mの高低差をもつ約12度の勾配をもち、作業坑は水平坑より拡幅されている。

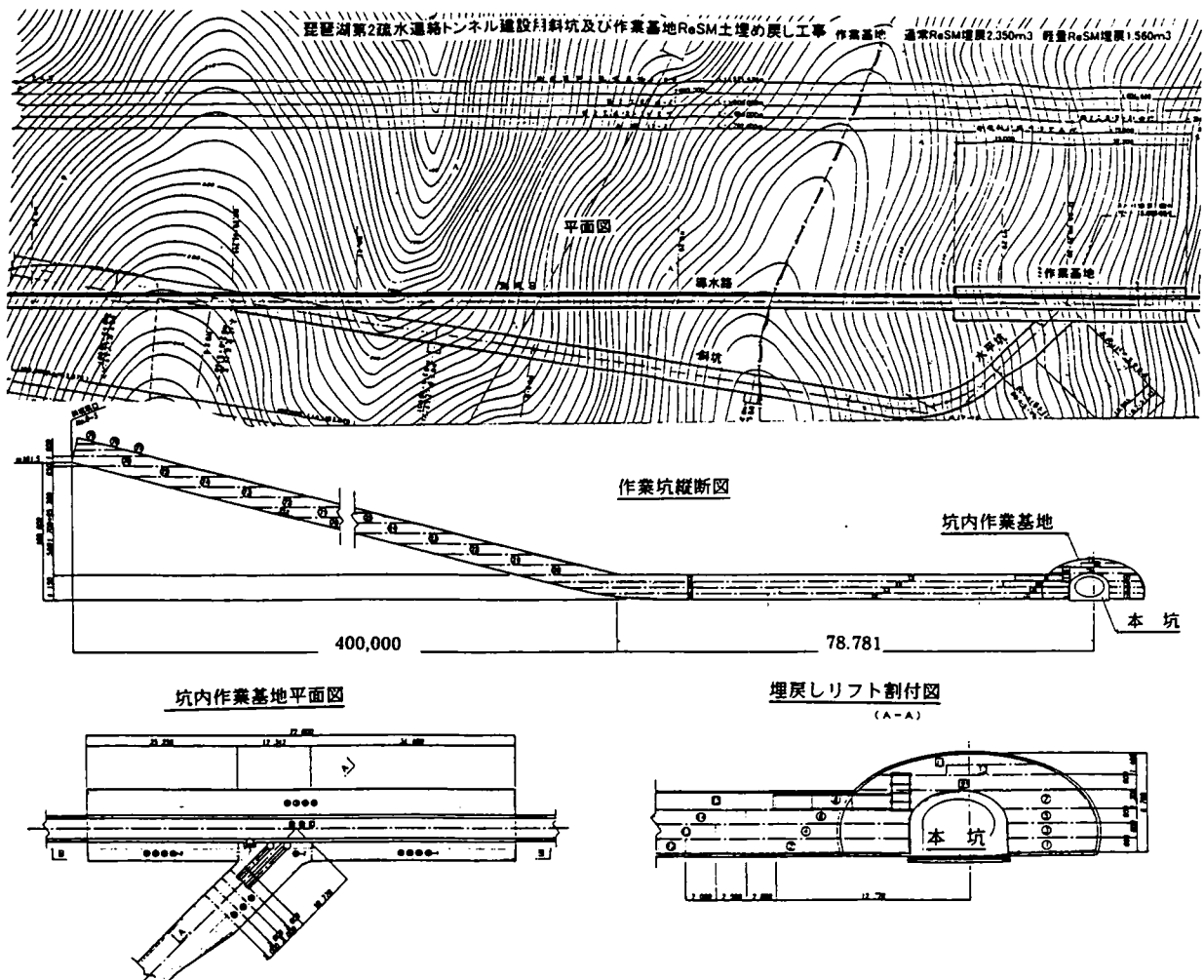


図3-49 琵琶湖第二疏水トンネル作業坑、水平坑、斜坑の断面・平面概略図

今回埋め戻しの対象となった、斜坑部、水平坑部および作業坑部の延長ならびに埋戻し容積を表3-16に示す。

表 3 - 1 6 埋め戻し容積

トンネル部位	延長(m)	埋め戻し容積(m ³)
斜坑部	421.31	8,965
水平坑部	22.09	1,710
作業坑部	72.00	3,920
計	515.40	14,585

(b) 工法の選定

当初計画ではズリの転圧・充填であったが、施工性が悪いこと、締め固めが不十分なため沈下により空隙が生じる可能性があること、頂部までの完全充填が難しいことなどから、流動性のある材料によるべきとの観点に立って、エアーモルタル、セメントミルク、生コンおよびReSMの各工法を比較した。

表3-17に、ズリを含む各種工法の比較検討結果を示す。

ズリの場合を除くいずれの工法も施工性、充填性は優れているものの、コスト面では建設発生土を用いるReSMソイルモルタルが最も優れていることから、充填工法としてReSM工法が採用された。

また充填強度については、水密的な充填が主たる目的であることに鑑み、硬質粘土程度の強度として200kN/m²以上（材令28日）を目標値とし、表3-18のような材料基準を設定した。

表 3 - 1 8 充填材料の基準

項目	基準値
単位体積重量	1.5t/m ³ 以上
フロー値	160mm以上
ブリージング値	3.0%以下
一軸圧縮強度	200kN/m ² 以上（材令28日）

表 3-17 各種埋め立て工法の比較

埋立て材料		ずり	エアーモルタル	セメントミルク	生コンクリート	ReSM
検討項目	使用材料	建設発生土等	水、セメント、砂、発砲材	水、セメント	水、セメント、砂、碎石	水、セメント、建設発生土
	使用材料の調達方法	土砂発生現場よりダンプトラックで運搬し現場にストック	セメント：現場にサイロ据付け 水：現場にタンク据付け 砂：購入砂現場ストック 発砲材：現場発砲	セメント：現場にサイロ据付け 水：現場にタンク据付け	生コンプラントよりミキサー車で運搬	セメント：現場にサイロ据付け 水：現場にタンク据付け 土：土砂発生現場よりダンプトラックで運搬し現場にストック
	材料費	◎	△	×	△	○
施工性	主要施工機械	ベルトコンベアー、バックホウ、ブルドーザー、転圧機械、換気設備	モルタル製作プラント(セメントサイロ、練り混ぜ機等)、コンクリート打設ポンプ車	セメントミルク製作プラント(セメントサイロ、練り混ぜ機等)、グラウトポンプ	コンクリート打設ポンプ車	土砂ホッパー、セメントサイロ、特殊ミキサー車、コンクリート打設ポンプ車
	現場設備費	×	△	△	◎	○
	施工方法	ベルトコンベアーで土砂運搬 BH、BDにより敷均し 転圧機により締固め 狭部は人力、小型転圧機を使用 上部空隙部はグラウトパイプを設置、セメントミルク充填(斜抗部不要)	プラントにエアーモルタル製造ポンプ車で搬送 1日の打設分は土壌で区画 上部空隙部はグラウトパイプを設置、セメントミルク充填(斜抗部不要)	プラントにてセメントミルク製造グラウトポンプで搬送 1日の打設分は土壌で区画 上部空隙部はグラウトパイプを設置、セメントミルク充填(斜抗部不要)	生コンをポンプ車で搬送 1日の打設分は土壌で区画 上部空隙部はグラウトパイプを設置、セメントミルク充填(斜抗部不要)	特殊ミキサー車へセメント、水投入 ホッパーより土砂投入 ポンプ車でReSM搬送 1日の打設分は土壌で区画 上部空隙部はグラウトパイプを設置、セメントミルク充填(斜抗部不要)
	施工性	敷均し、転圧機械の能力による	練り混ぜ機械の能力、配管の段取換えによる。但し、流動性は落ちる	練り混ぜ機械、グラウトポンプの能力による	配管の段取換えによる	ReSM製作能力、配管の段取換えによる
	施工性	×	○	○	◎	◎
充填度		△	◎	◎	◎	◎
作業環境		×	◎	◎	◎	◎
m ³ あたりのコスト		4,500~7,000円 但し、水平抗頂部はエアーモルタル等を充填する必要がありコストアップ	10,000~15,000円	20,000円	10,000~12,000円	7,000~8,000円

(c) 配合設定

発生土の再利用の課題として、主材（発生土）の特性に違いがあり、現場ごとに現地発生土を用いて基準を確保するための配合試験を行なう必要がある。当該現場では、表 3-19に示すような19ケースの現場発生土を用いた室内配合試験を行った。当該現場では流動

時と固化後の物性を測定し、その試験結果から、現場における基準配合を表3-20のように設定した。なお、坑内作業基地および水平坑の頂部については埋戻し材の流動性やエア一抜き設備等だけでは充填が難しいことから、打設直後の追加的な起泡による膨張を期待して気泡ReSMを採用した。

表 3 - 1 9 配合試験結果

test No.	単位量(kg/m ³)		限界土配合比		流動時物性			固化時物性			
	加水量	セメント量	ヒリ	残余土	湿潤密度	フロー値	ブリージング率	一軸圧縮強度(N/mm ²)		単位体積重量(g/cm ³)	
	W	C	S	M	γ	Fl	Br(%)	qu7	qu28	$\gamma'7$	$\gamma'28$
1	400	100	1	0.2	1.71	253	2.7	0.08	0.27	1.68	1.702
2	400	100	1	0.4	1.712	225	1.3	0.09	0.24	1.704	1.707
3	400	100	1	0.6	1.711	213	0.6	0.1	0.27	1.695	1.697
4	400	100	1	0.5	1.705	213	0.9	0.09	7	1.708	1.705
5	450	100	1	0.5	1.643	244	2.3	0.07	0.24	1.637	1.657
6	350	100	1	0.5	1.771	190	0.5	0.14	0.32	1.764	1.765
7	400	75	1	0.5	1.706	227	1.3	0.07	0.16	1.698	1.705
8	400	125	1	0.5	1.719	218	0.1	0.15	0.46	1.724	1.716
9	300	100	1	0	1.775	166	1.5	0.15	0.41	1.936	1.956
10	400	75	1	0.2	1.73	278	3	0.07	0.13	1.72	1.737
11	400	125	1	0.2	1.762	255	1.9	0.17	0.4	1.754	1.77
12	350	100	1	0	1.908	223	3	0.17	0.37	1.885	1.897
13	450	100	1	0.2	1.695	320	4.4	0.12	0.3	1.683	1.733
14	350	100	1	0.2	1.855	198	1	0.18	0.39	1.829	1.846
15	400	100	1	1	1.66	197	0.7	0.18	0.37	1.633	1.65
16	450	100	1	1	1.605	220	1	0.14	0.31	1.603	1.603
17	500	100	1	1	1.541	259	1.8	0.1	0.26	1.537	1.549
18	450	75	1	1	1.588	216	1.1	0.11	0.23	1.57	1.595
19	450	125	1	1	1.631	208	0.6	0.25	0.5	1.614	1.622

W：単位加水量 C：単位セメント量 S：土の配合比（発生土） M：土の配合比（粘土）

表 3 - 2 0 配合設計値

	坑内作業基地・水平坑	坑内作業基地・水平坑頂部	斜坑
高炉セメント	100kg	200kg(146kg)	100kg
原料土	0.6m ³	0.6m ³ (0.46m ³)	0.6m ³
水	650kg	650kg(500kg)	650kg
気泡	無し	0.27m ³	無し
目標密度	1.35t/m ³ 以上	1.10～1.15 t/m ³	1.35 t/m ³ 以上
一軸圧縮強度	200kN/m ² 以上		

() 内は起泡後の1m³当たりの単位量を示す

(2) 施工結果

(a) 埋戻し方法

ソイルモルタルでの埋戻しは、作業ヤードに原料土を搬入し、ソイルモルタルプラントにて水、セメント、原料土を基本配合に従い混合し、ReSM改造ミキサー車にて攪拌した。この高流動化したソイルモルタルを、斜坑坑口より高性能コンクリートポンプにて約550m圧送し、作業基地部→水平坑部→斜坑部の順で埋戻しを行った。このうち、作業基地坑頂部および水平坑頂部の埋戻し部では、先述のように基本配合したソイルモルタルに気泡を混合し、頂部の空隙防止を図った。

以上の埋め戻し工程を図3-51に、ReSMソイルモルタル製造プラントの平面図を図3-50に、それぞれ示した。

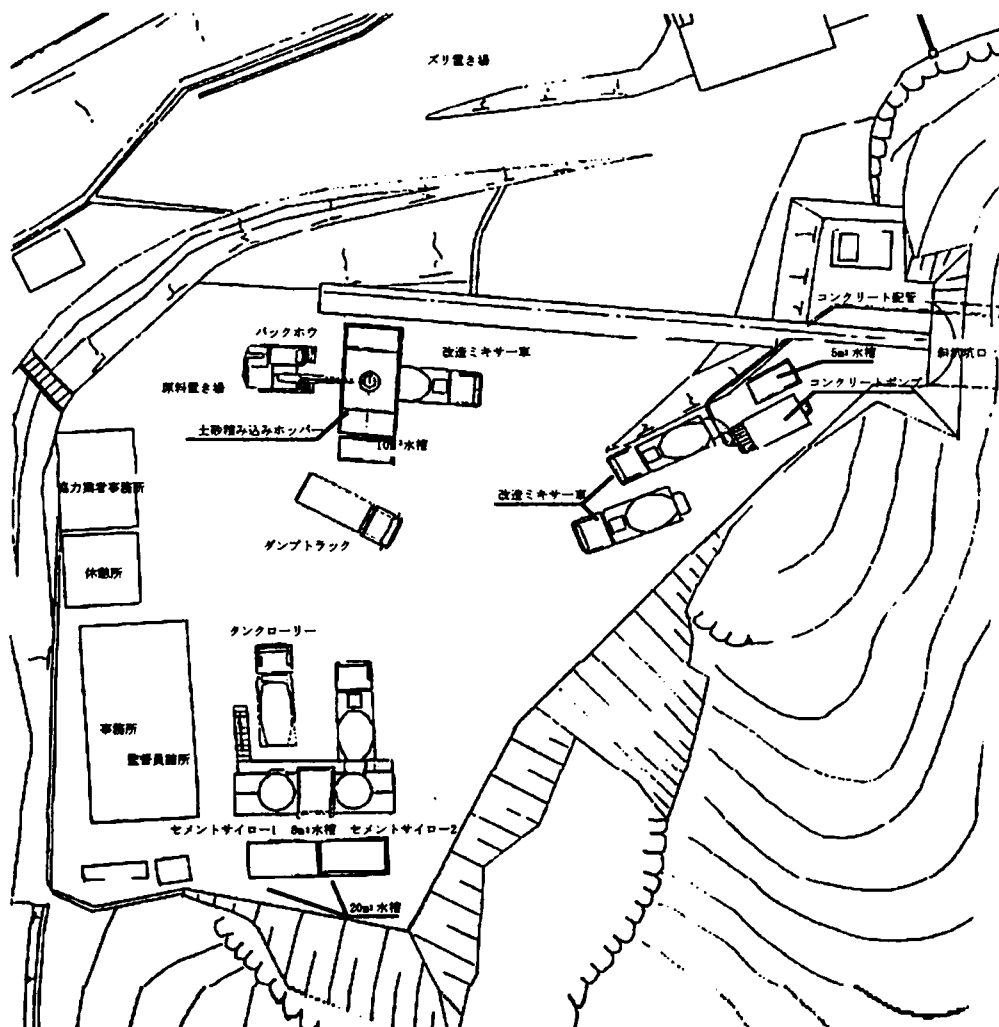


図3-50 ソイルモルタル製造プラント平面図

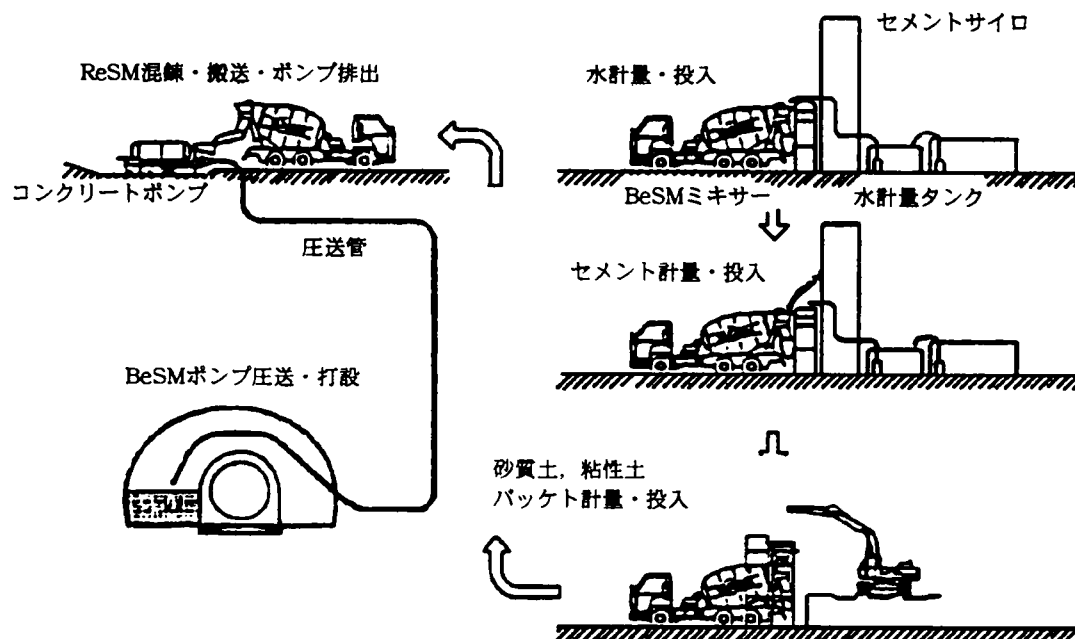


図 3-5 1 埋め戻し工程²⁰⁾

以下、本施工事例での特徴的な点を記しておきたい。

- ① 今回の現場は、圧送距離が長いことから、材料製造時の工夫として流動性の高いソイルモルタル製造したが、斜坑が延長400mの下り勾配25%で高低差100mがとなることから、ソイルモルタルの分離が懸念された。このため、配合試験段階で水量を少なくして、密度を高めたソイルモルタルを製造して圧送した。
- ② 水平作業基地トンネルの頂部は楕円形になっており凹凸があるため、頂部埋戻し時には切り型枠を設置し、圧送管(φ115mm)を最頂部に設置した。またエア抜き管(φ75mm)も数本配管し、エリア毎に設置した数本のエア抜き管からのソイルモルタルの吹き出しによりその充填を確認した。
- ③ 配管は、坑口から220mは高圧管φ125mmを使用し、他は低圧管φ125mmを使用した。各所にシャッターバルブを設け、万一の閉塞に対応できるようにした。斜坑には80m毎に曲がり管を設けソイルモルタルの流速を押さえ、材料の分離、管の閉塞を防止した。また、気泡混合時は坑口にスパイラル管(写真3-6(c)参照)を設け、気泡とソイルモルタルを攪拌・混合しやすくした。

写真3-6(a)～(d)に施工状況の代表的な写真を示している。



(a) 発生土積み込み状況



(b) セメント積み込み状況



(c) スパイラル管



(d) 作業坑内打設状況

写真 3-6 トンネル空洞充填施工写真

(b) 品質管理結果

日常品質管理として、ソイルモルタルを毎日午前、午後の2回採取し、一軸圧縮強度試験、フロー値試験、ブリーソング試験、密度試験を行い、規格値を満たしているかの確認を行った。図3-52に一軸圧縮強度試験結果のヒストグラムを示しているが、すべて200kN/m²以上となっている。

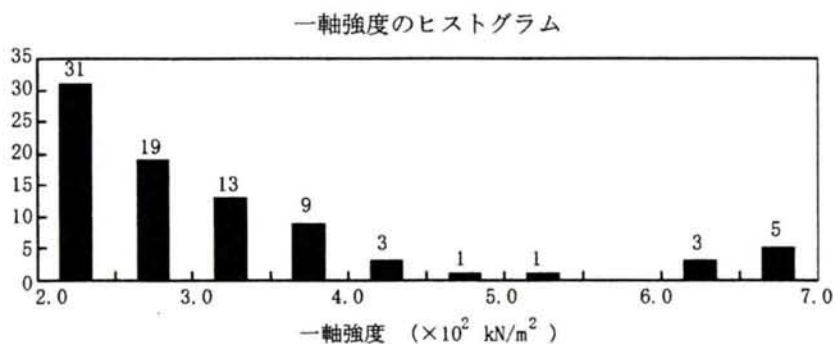


図 3-52 一軸圧縮強度試験結果

3. 6 おわりに

本章では、第2章で確認した適用分野ごとのソイルモルタルの材料特性を現場に反映させ、それぞれの分野で大きな成果を得たことを確認し、また、さらなる研究開発展開への様々な示唆を得た。以下に、それらの成果を要約しておきたい。

(1) 現場注入実験結果

- ① 現場注入実験は2回行ったが、1回目は室内実験で選定されたホモゲルについて、ロッド注入及びマンシュート注入の2通りの注入方式で実施した。現場透気試験結果において成果が見られたが、竪坑掘削に伴っての確認では対象の砂礫層への注入はごく一部を除いて確認されず、上部シルト層との層境界へ版状または脈状に注入が集中する結果となった。
- ② 2回目については、注入剤の粘性やゲルタイムといった材料面と注入方式の検討を行い、前者については水ガラスの併用、後者についてはマンシュート注入の他にストレーナ注入や2重管注入方式にチャレンジした。第2次立坑掘削時において砂礫層への注入状況の確認と、原位置透水試験結果により2オーダーの透水係数改良成果が確認された。
- ③ 滞水砂礫層シールド工事の遮水工法としての本採用には至らなかったが、以下のような条件を前提に今後のさらなる研究開発の可能性を残した。

地盤条件：透水係数 10^{-1}cm/sec 以上の砂礫層やシルト層

粘土条件：付近で多量のローカルクレイが得られ、粘土鉱物が多く含まれていること。

注入範囲：線としての改良よりマスとしての改良に適する。また量も多いこと。

注入方式：二重管注入方式やマンシュート注入方式のように、ある程度高圧注入の可能な方法またはジェットグラウドなど。

(2) 遮水壁工法

- ① 竪坑遮水壁の現場実験の結果、全ての方法について有効な遮水効果を確認したが、現場採取試料についての強度面において、泥水混合方式及び泥水モルタル方式は、PIP方式や置換方式に比べ強度が大きくなる方向でバラツキが目立った。この2つの方式は掘削中の泥水に地山の土砂が混入され強度が増加する可能性が多いことを示唆している。
- ② 現実の工事では、その大部分を PIP 方式により延べ $13,000\text{m}^2$ の遮水壁を施工した。現場実験レベルではともかく、これだけの量の工事を行うには大量の粘土粉碎方法が問題になる。実験では鋼球を用いてのボールミルタイプを採用したが、本工事では多羽根式スライスタップを採用した。この経緯が、ReSM工法においてミキサー車内に羽根とピアノ線を併用するという展開に発展している。
- ③ それ以外の工事では、製品としての岡山産粘土を使用した。これまでは壁土等にし使用されなかった材料が、シールド裏込め注入材料など土木資材として汎用的に使用され出した契機ともなった。

- ③ また、泥水混合方式は、安定液を固化させて土留め、遮水壁とする工法（ケイソイル工法）へと発展したが、水ガラスを用いて短時間に硬化させる点や、エアブローで攪拌を行う等の新しい技術が導入された。

（３）ReSM工法による埋戻し・空洞充填工事

（ａ）ReSM工法 の特徴

これまでの流動化処理土やソイルモルタルが大型固定プラントで製造されたのに対し、ReSM工法では、粘性土の粉碎をベースに製造と運搬とをミキサー車で行うという極めてシンプルなシステムで、土砂発生現場が品質を作り出すことになる。

そのシステム的な特徴として、

- a) プラントが不要で、都市土木に適している
- b) 処理量の増減に容易に対応できる
- c) シンプルで故障等が少なく、
- d) 全体システムとして 安定性がたかい

また、品質面では、

- a) 品質は土砂発生側で作り出すため、発生土砂の特性に対しての管理が可能となる
- b) 砂礫やコンクリートガラが混入していても、ミキサー混合が可能
- c) 長時間の品質安定性が維持できる

などの優位性が確認された。

（ｂ）大阪地下鉄 7 号線での適用事例

i) 概要

平成 6～9 年にかけて施工された大阪市地下鉄大正延伸工区（15～20 工区）では、17～20 工区の 4 工区が担当する土圧シールド区間で発生する、流動化した土砂を ReSM 工法によりソイルモルタル化して、15～20 の 6 工区における開削工法停留上部の側部および頂部の埋戻しに材料として有効利用した。一部搬入土使用部分を含め、総量は 22,643m³ に達しており、有効利用率は全シールド発生土砂量の 10% 強となっている。

施工の手順は、要求される配合（標準配合をベースに発生土砂の土質や比重に応じて、また、埋め戻し部位等使用目的に応じて、セメントおよび追加水量を調整）に対し、水・セメントを先行して計量投入し、残り 5m³ になるように発生土を投入するという、いわゆる容積管理によることが特徴である。

ii) 品質特性

関連要素のいくつかの相関関係としては以下の通りである。

- a) 発生土砂単位体積重量と処理土単位体積重量：側部ではセメント量を増やし追加水量を減少させたため、頂部に比べ処理土重量が 0.2g/cm³ 程度大きい
- b) フロー値と処理土単位体積重量：土質に応じて 10～25 秒に調整された結果であり、とくに相関はない

c) 発生土および処理土単位体積重量と強度：側部において正の緩い相関が見られるが、頂部についてはほとんど単位体積重量の影響を受けない

d) 発生土利用率や加水量についても、強度との相関は見られない。

iii) 品質管理

- ① セメント量以外の要因が強度に与える影響を分離することが出来なかったが、セメントについては加水量との比、とくに想定全水量との比で相関はより明確になる。今回の工事ではシールド掘進管理データによる含水量をベースに配合を設定したため、発生土もしくは処理土の含水量をその都度正確に測定するまでには至っていないが、簡便な方法でこまめに確認できれば品質管理精度が増すことになる。
- ② 上述のように強度はセメント量に大きく影響を受けるが、一軸圧縮試験結果の頻度分布で整理する限り実用的に良好な結果を得ている。また、1 週養生と 4 週養生の関係も良好な相関を示しており、現場での品質管理は 1 週強度（場合によっては 3 日強度）で代用できるといえる。
- ③ 今回のような埋戻しの設計については、コンクリート構造物等とは異なりマスで評価することが重要となる。例えば全体が 100m^3 という埋め戻しに当たり、20 台分全量が目標強度の $1/2$ であれば問題は大きくなるが、処理土の単位体積重量等により安全側の補正をこまめに行うことにより、埋戻し地盤というマス構造としての機能は果たされとの考えで整理し、「打設量」と「打設量」×「一軸圧縮強度」のそれぞれの累積値の関係図で管理するという新しい手法を試みた。その結果、頂部については $150 \sim 200\text{kN/m}^2$ の範囲内に、また側部については 800kN/m^2 以上によく管理されており、ソイルモルタルによる人工地盤としての機能が確認された。

iv) 施工結果

ソイルモルタルによる埋戻しの効果として、多種多様な埋設物の受け防護等、通常の土砂による埋戻しでは不可能な個所にもきめ細かく充填され、将来の路面沈下や陥没の可能性に対する不安を払拭できた。また、側部についても狭隘な場所での支保工盛換え作業や、水締め等施工難度の高い要求品質に取って代わって、安全で簡便な施工法によることができた。SMW 工法によるたわみ性土留壁の変形についても、埋戻し支保工撤去時の方が掘削支保工架設時よりも大きいことが希でないという、これまでの傾向をうち破る、極めて良好な結果を得た。

(c) その他の実施例

そのほかの ReSM 工法採用事例として、琵琶湖第二疎水トンネルの作業坑、斜坑および水平坑の埋め戻し工事（計 $14,585\text{m}^3$ ：水平坑頂部等に一部気泡混合軽量土使用）およびタンク基礎埋め戻し工事（ 580m^3 ）がある。何れも良好な結果を得た。

とくに、第 2 疎水トンネル作業坑等の埋戻しにおいては、水平坑部分の頂部の充填をより確実にするために気泡軽量 ReSM 工法を採用した。地下 100m に位置するためその確認には至っていない。

ただ、ガスパイプライン埋戻し現場実験工事では、浮力を抑えるために管の下部について気泡混合軽量土を使用した。気乾養生を行った供試体の強度が、材令と共に低下する現象が確認された。気泡混合土には、解決すべき課題が多い。

【 第3章 参考文献 】

- 1) 箭本実, 有岡正樹他: 大阪粘土を用いた注入材に関する実験的研究 (Ⅱ), 熊谷技報 第 18 号, pp67~83, 1976 年 12 月
- 2) 日本材料学会編: 薬液注入工法 (指針と解説), 鹿島出版会, p32, 1968 年
- 3) 土質工学会編: 土と基礎 実用数式・図表の解説, 土質基礎工学ライブラリー 7, p24, 1971 年
- 4) 貝沼憲男, 安田登, 神藤健一, 小熊登: ソイルセメントグラウトの適用性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.644/VI-46, pp149~159, 2000 年 3 月
- 5) 箭本実, 有岡正樹, 堀家茂一: 土モルタル遮水工法の技術開発と施工例, 熊谷組技報 No.20, pp83~102, 1977 年 12 月
- 6) 有岡正樹: 滞水砂礫シールドにおける粘土モルタル遮水壁の施工と応用, 日本プロジェクト・リサーチ, 講習会テキスト ppKU-1~KU-18, 1976 年 5 月
- 7) 表友宏: 滞水砂れき地盤におけるシールド補助工事の計画, 施工技術 Vol.6, No.9, pp92~98, 1973 年 9 月
- 8) 箭本実, 有岡正樹: 滞水砂れき層におけるシールド補助工事の計画と施工, 日本プロジェクトリサーチ講習会テキスト, PKU 1~22, 1974 年 9 月
- 9) 平田武弘, 表友宏: 滞水砂礫地盤におけるシールド工事, 施工技術 Vol.8, No.3, pp21~30, 1975 年 3 月
- 10) 大阪市交通局, (株)熊谷組大阪支店: 滞水砂れき層におけるシールド工事の施工と補助工法, 地下鉄 2 号線 1 6 工区工事記録, 1975 年 12 月
- 11) 松尾英夫, 大倉庸平他: 地下水の豊富な玉石砂レキ層における土留工法と内部掘さく, 熊谷技報第 19 号, pp40~52, 1977 年 6 月
- 12) 熊谷組大阪支店: 地下線路および大日停留場一部工事 (48 工区) 工事記録, 1983 年 2 月
- 13) 熊谷組大阪支店: 地下鉄 1 号線新金岡停留場工事 (8 工区) 工事記録, 1983 年 11 月
- 14) 江坂匡示, 有岡正樹, 森邦夫, 後藤徳善: 建設発生土を用いた埋戻し (その 1) - 発生土を用いた中低強度安定処理土の施工管理システムの事例, 第 2 回地盤改良シンポジウム発表論文集, pp63~68, 1997 年 1 月
- 15) 有岡正樹, 森邦夫, 小野裕克, 許任天: 建設発生土を用いた埋め戻し (その 2) - 中低強度安定処理土の物理・力学特性に関する事例研究, 第 2 回地盤改良シンポジウム発表論文集, pp89~74, 1997 年 1 月
- 16) 江坂匡示, 有岡正樹, 森邦夫, 後藤徳善: 高流動化処理による建設発生土の再利用と施工管理, 材料, Vol.47, No.2, pp124~127, 1999 年 2 月

- 17) Masaki Arioka & Kunio Mori, Toru Shibata, Shuji Hirakawa & Akira Nishihara :
A Management System for Backfilling Highly Liquified Stabilized Soil Using a Modified
Concrete Mixing Truck, International Symposium on PROBLEMATIC SOILS, IS-
TOHOKU Bull.3, pp693~696, 1998
- 18) 平川修治, 柴田徹, 西原晃, 有岡正樹, 森邦夫 : 泥土の有効利用法に関する実験研究,
福山大学工学部紀要 第23巻, pp21~25, 1999年10月
- 19) 有岡正樹, 石田和夫, 森邦夫, 高倉伸和 : ReSM工法-発生土を均質な地盤材料に,
基礎工, VOL.26, NO.11, pp94~95, 1998年11月
- 20) 熊谷・三井・大豊特定建設工事共同企業体 : パンフレット (高速電気軌道第7号線 ; 大正
~心斎橋間延伸工事概要), 1995年
- 21) 大阪市交通局, 熊谷・三井・大豊特定建設工事共同企業体 : 軟弱な沖積粘土層と高被圧水
の洪積砂礫層に挑む, pp154~157, 1997年1月
- 22) 浦田淳一 : ポンプ圧送工法による ReSM 施工段階での改善点及び今後の課題, ガイアー
トクマガイ技術研究発表会概要集, pp50~51, 2000年

第4章 ソイルモルタルマネジメントシステム

4. 1 はじめに

これまでも述べてきたように、「低品質」な発生土である泥土や粘性土をソイルモルタルという形で高度利用するために多方面での研究開発を実施し、それらのいくつかは現場での適用を通してそのマネジメントのあり方を含め、多くの知見を得てきた。そしてそれらを総合化する試みとして、精密地盤改良システム、ロジスティックシステムおよびリスクマネジメントシステムの、3つのマネジメントシステムを適用すべく議論を重ねてきている。

本章では、それらのマネジメントシステムについて、ReSM工法による埋戻し、空洞充填などの人工地盤構築を前提に、その計画・設計およびソイルモルタルの製造・運搬、品質管理の今後のあり方について考察し、そのマネジメントシステムの適用分野の例として、オール廃棄物再生利用によるスーパー堤防築造の考え方について提案しようとするものである。

以下導入に当たって、本章での概要を述べておきたい。

(1) 精密地盤改良システムの考え方

本論文で筆者らが提案しているReSM工法は、地盤材料のバラツキに応じて逐次配合を変えることにより不確実性を極力排した工法であり、それをベースに設計的にも全体をマスとして捉えようとするもので、これまで地盤改良に適用されてきた限界設計法に基づく、過大な安全率を見込んだ信頼性設計を再検討しようとするものである。これを精密地盤改良(Precision Soil Stabilization)と称しているが、筆者らが新しく提案しているマネジメントの概念であり、10年ほど前に米国で提案され、欧米で発展・普及した精密農法(Precision Farming)を発想の原点としている。ReSM工法を例に、それらの二つの考え方について比較対処を試みるものである。

(2) ロジスティックシステムの考え方

ReSM工法による精密地盤改良システムを具体化するためには、それを構成する次の4つのサブシステムを完結させる必要がある。

- ① 発生工区マップ管理システム
- ② 改良工区マップ管理システム
- ③ 意思決定システム
- ④ 可変作業管理システム

このうちもっとも重要で基本的なものが③意思決定システムで、この方法は、施工実績が蓄積されるに従って強度のバラツキが小さくなるという特徴を持っている。具体的には、第3章でも触れた累積管理の考え方であり、累計確率管理手法をベースにしている。

一方、精密地盤改良システムを構成する4つのサブシステムのうち、前述の③意志決定システムを除く3つのシステムは、いずれも物流管理に関するシステムとなるが、そのシステムの管理帳票事例を上げてそのあり方を概観している。

さらに、建設発生土再生利用の終局の方策は、広域化、IT化であり、流通でいうジャストインタイム方式としてのサプライチェーンマネジメント（SCM）システムについて考察している。

（3）リスクマネジメント

また、以上のようなロジスティックシステムを精密地盤改良システムに反映させるためには、いまひとつリスクマネジメントの考え方をコンバインさせることが重要となる。

筆者は、国内外で、公共事業の民営化手法であるBOTやPFIシステムに深く関わってきており、とくに建設事業との係わりでのリスクマネジメントに関心が強い。

そのような背景もあって、広く建設事業分野との関係でリスクマネジメントの概念を整理し、それらがソイルモルタルによる人工地盤構築の各段階でどのように反映され、また、とくに精密地盤改良システムとの関連でどう展開されるかを考察してみたい。

（4）スーパー堤防構築への適用に関する一考察

ソイルモルタルの人工地盤構築の具体例として、汚泥と同じく建設系産業廃棄物であるコンクリートやアスファルトガラ、木片、陶器・ガラス片などをソイルモルタルとコンバインして有効利用を図り、オール廃棄物再生利用堤防を構築することを提案しようとするものである。

例えば、首都圏における産業廃棄物の処理状況は、各廃棄物とも再生利用の他、とくに減量化に対する貢献比率が大きいですが、それでもなお最終処分量は年間750万トンにも上っており、汚泥やがれき類等上記の埋立て材料がその大部分を占めることを例に上げ、その妥当性を示すとともに、それを実現するためには引き続き制度的、商習慣的課題を克服していく必要性を強調している。

4. 2 計画・設計の考え方

4. 2. 1 地盤安定処理におけるバラツキの概念^{1), 2), 3)}

地盤改良の歴史は古く、基礎構造物としての地盤強度設計としては数多くの方法が提案・利用されてきた。原位置地盤改良である浅層混合処理工法や深層地盤処理工法と、本論文で対象とするソイルモルタルは、セメント系固化材を用いるという点で同じであり、基本的には地盤改良と同じ設計法である確率論に基づいた限界設計法による信頼性設計が用いられることになる。この設計法は、地盤物性や地盤材料、および改良システムの不確実性を確率変数として、地盤強度の安全性を定量的に求めるというものである。そして、このような基礎地盤の限界信頼設計法に対する部分安全係数の決定は、信頼性理論を用いる場合も、地盤の複雑さや改良工法の特性を考慮せずに行われてきたといえる。

安定処理においては、死荷重に対する通常の活荷重の範囲 0~0.5 において限界設計法の全体安全率が 1.5~3.2 程度であること、深層混合処理、浅層混合処理における信頼性理論における安全率も 2~3 であることなど、従来の設計法の安全率 2 ~3 に近いことから、これらの安全率が安定処理における安全率として用いられてきた。

しかし、これらの信頼性に基づく安全率の決定は、不確実な地盤に対しては安全な地盤構造を構築するために必要であるが、本論文で著者らが提案している ReSM 工法は、地盤材料のバラツキに応じて配合を変えることにより不確実性を極力廃した精密地盤改良 (Precision Soil Stabilization) を目指すものであり、信頼性設計に基づいた安全率の設定は過大な安全率を見込んだ設計となる。

すなわち図4-1に示すように、従来の設計法では地盤強度を 0.7Mpa (700kN/m^2) とすると、例えば安全率を 2 として配合設計強度として 1.4Mpa (1400kN/m^2) を設定し、これを満たすように施工することで、地盤強度 0.7Mpa (700kN/m^2) を下回る確率を 5% 以下にする設計が行われている。

重要構造物基礎を構築する場合、様々な要因を考慮して安全率を高めに設定することが必要であるが、地盤を埋戻すようなソイルモルタルの設計においては地盤と同等の強度とバラツキを持てばよいことになる。その場合、従来の定置式処理プラントでは、複数現場から集積される発生土を再利用することになるため、地盤材料特性のバラツキが直接ソイルモルタル強度に影響することになり、原位置安定処理ほどではないにしても、図4-2のように大きなバラツキを持つことになる。これに対し、著者らの提案する ReSM 工法は、ソイルモルタルの強度を決定する要因 (細粒分、加水量を含む含水量、セメント添加量) を発生土側で積極的に管理することで強度のバラツキを少なくするため、従来の安定処理土に比べて強度のバラツキが小さいという特徴をもつことになる。

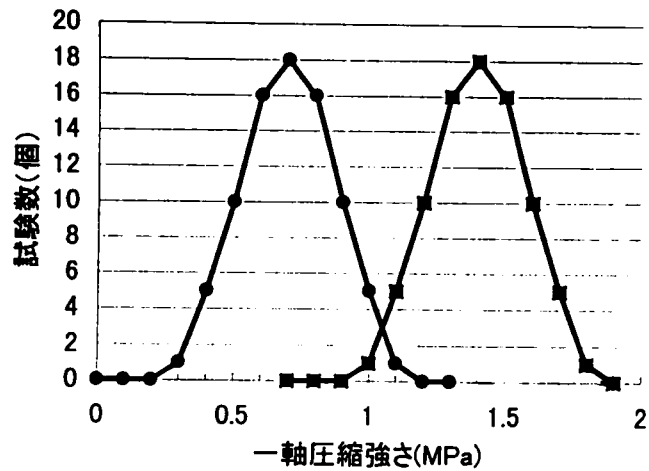


図 4 - 1 地盤安定処理における配合設計

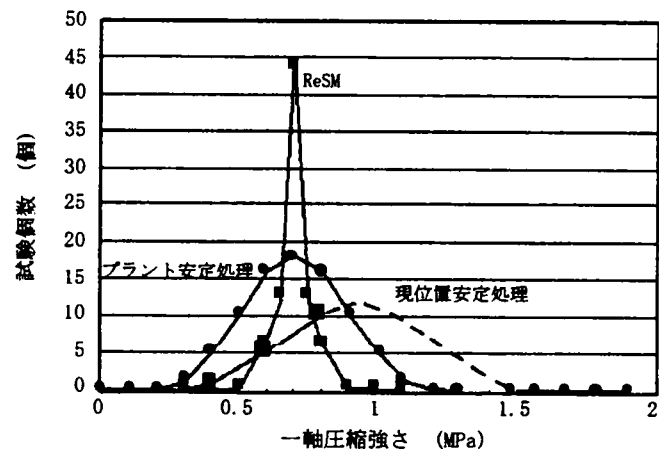


図 4 - 2 ReSM工法と他の安定処理工法とのバラツキの違い（概念図）

このようなReSM工法の配合設計管理の考え方を図4-3に示すが、ReSM工法は、発生土の材料特性を考慮しながら、逐次新しいデータ（材料特性、強度などの変化など）を取り入れながら初期配合による基準値の不備を修正し、かつ、万一強度が不足または過大である場合でも 3 日後には修正するような配合管理を行うため、プラント安定処理よりもバラツキの範囲を小さくすることができる。

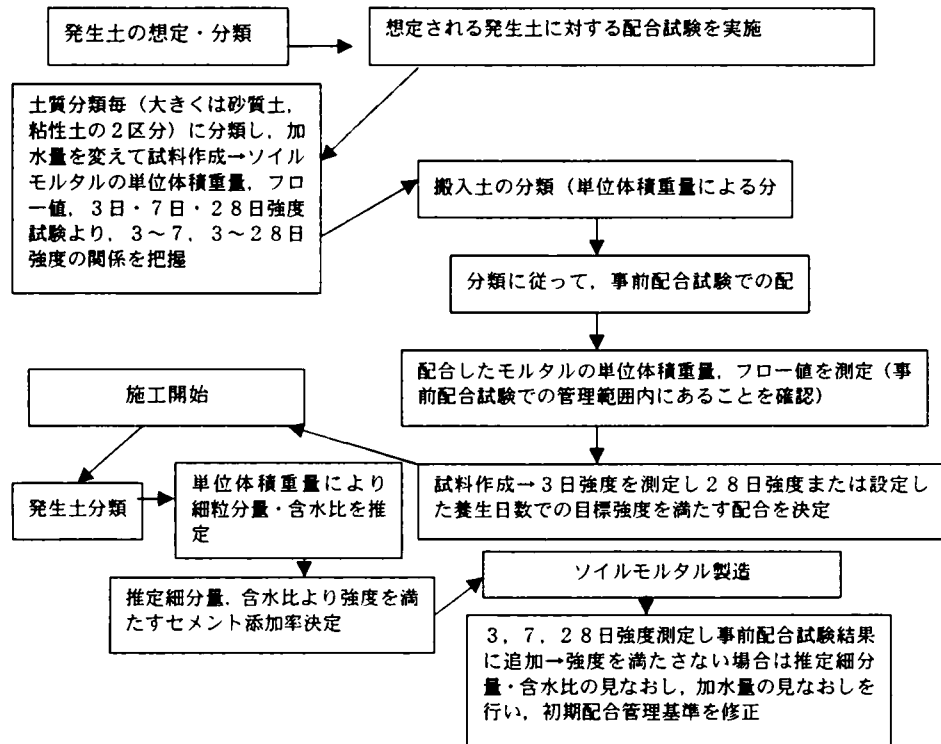


図4-3 ReSM工法の配合設計管理の考え方

4.2.2 地盤構造物としての安全性の考え方

ReSM工法の特徴としてその逐次配合設計管理の考え方を上げたが、そのような視点を人工地盤構造物の安全性に反映させて評価してみたい。

地下空間を充填する場合、エリアを分割して、様々な発生土を原材料とするReSMで層状に薄く充填する。ミキサー車の製造能力は約 30m³/台・日程度であり、例えば第3章で紹介した地下鉄工事の埋戻しでは、5台で1日150m³程度の打設を行っている。1日の打設厚さは、地下鉄駅舎部などの低強度充填では約 30cm 程度、高強度の壁体部では約 50～100cm 程度である。

打設されたReSMソイルモルタルは、配合強度 $q_{u_{mean}}$ を満たすように図4-4のように打設される。

これらのブロックは、それぞれ異なる一軸圧縮強度 (q_{ij} ; 断面 I 層, 平面 J ブロック)、打設量 (V_{ij} ; 断面 I 層, 平面 J ブロック) であるが、このような複合地盤の平均一軸圧縮強度 $q_{u_{mean}}$ および平均変形係数 E_{mean} は、

$$E_{mean} = (\sum_{ij} (V_{ij} \times E_{ij})) / (\sum_{ij} V_{ij}) \quad (4.1)$$

$$q_{u_{mean}} = (\sum_{ij} (V_{ij} \times q_{ij})) / (\sum_{ij} V_{ij}) \quad (4.2)$$

で与えられ、また、断面の平均せん断強度 τ_{mean} も同様に、

$$\tau_{\text{mean}} = (\sum ij(\tau_{ij} \times L_{ij})) / (\sum ij L_{ij}) \quad (4.3)$$

L_{ij} ；各ブロックのせん断長

となる。

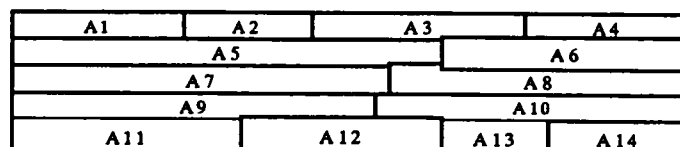


図 4-4 (1) 地下空間における ReSM 打設断面概念図

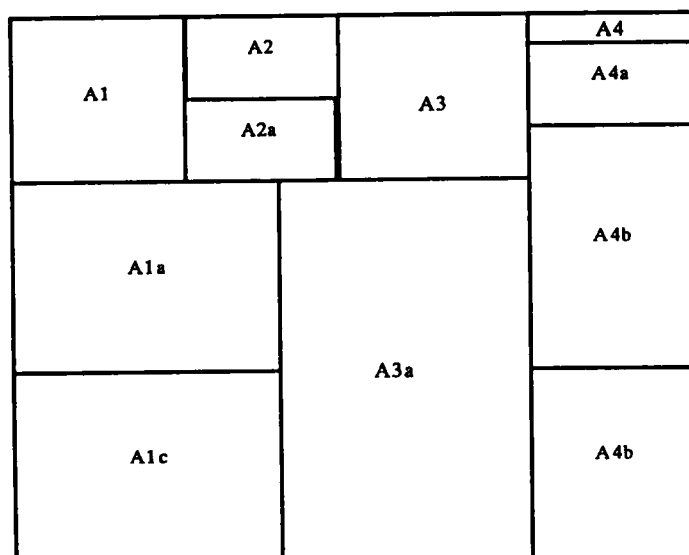


図 4-4 (2) 地下空間における ReSM 打設平面概念図

これらのパラメーターは互いに相関関係をもつことから、ソイルモルタルによる地盤構築においては、如何に各ブロック毎の一軸圧縮強度 $q_{u_{ij}}$ のバラツキを小さくし、かつ平均強度 $q_{u_{\text{mean}}}$ を地盤の設計強度 q_u に如何に近づけるかが、施工管理上の課題となる。

4. 2. 3 精密地盤改良システムとは

(1)精密農法と精密地盤改良システム

地盤材料のバラツキに応じて配合を変えることにより、不確実性を極力廃することを目的とする ReSM 工法は、環境保全と改良強度確保を効率的に同時に行うマネジメント戦略であり、工区毎の地盤材料特性のバラツキと改良方法、製造したソイルモルタルの特性や強度を記録し、地盤材料特性に応じて適切な改良材を可変的に配合するものである。これ

までの改良工法では、改良強度が安全側であることを前提に目標強度に対するセメント添加量は一定としているが、ReSM工法では、第3章の事例でも示したように、情報としての発生土の性状や単位体積重量、さらには日常的なフロー値や強度管理データに基づきセメント量を調整してきた。このような視点での地盤改良システムを精密地盤改良(Precision Soil Stabilization)と称するが、限られたセメント量で改良することで環境への影響も避けながら、最大効率の改良効果を上げることを期待しようとするものである。

精密地盤改良は、著者らが新しく提案しているマネジメントの概念であり、10年ほど前に米国で提案され、欧米で発展・普及した精密農法(Precision Farming)を発想の原点としている。精密農法は、洪澤⁴⁾により日本への導入が試みられているところであるが、大規模な圃場の農作物のバラツキ管理を最大のターゲットとして考え出されたもので、現在欧米では数百ha規模の圃場を一括管理できる能力を持っている。

精密農法では、収穫効率最大化を目的として作物、圃場、技術、地域システム、農家の経営動機等の全てがシステム内に取り入れられ、例えば、収量メータ付きコンバインによる収穫量マップ、リモートセンシングによる作物情報マップ、土壌サンプリングによる土壌マップなどが作業現場に普及しつつある。

精密農法では、図4-5に示すように圃場の各種データをセンサーにより計測し、これらデータマップと収穫量マップとの関連を経験的、科学的に分析した上で、収穫量を最大化するための適切な肥料の種類、散布量を決定し散布する。

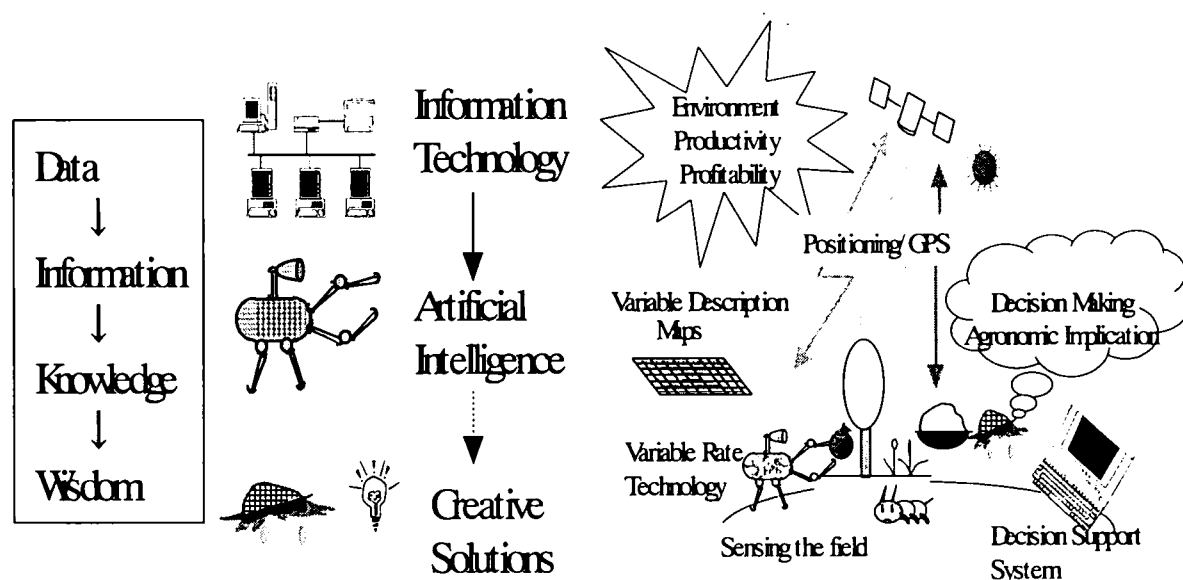


図4-5 精密農法における情報のレベル⁴⁾

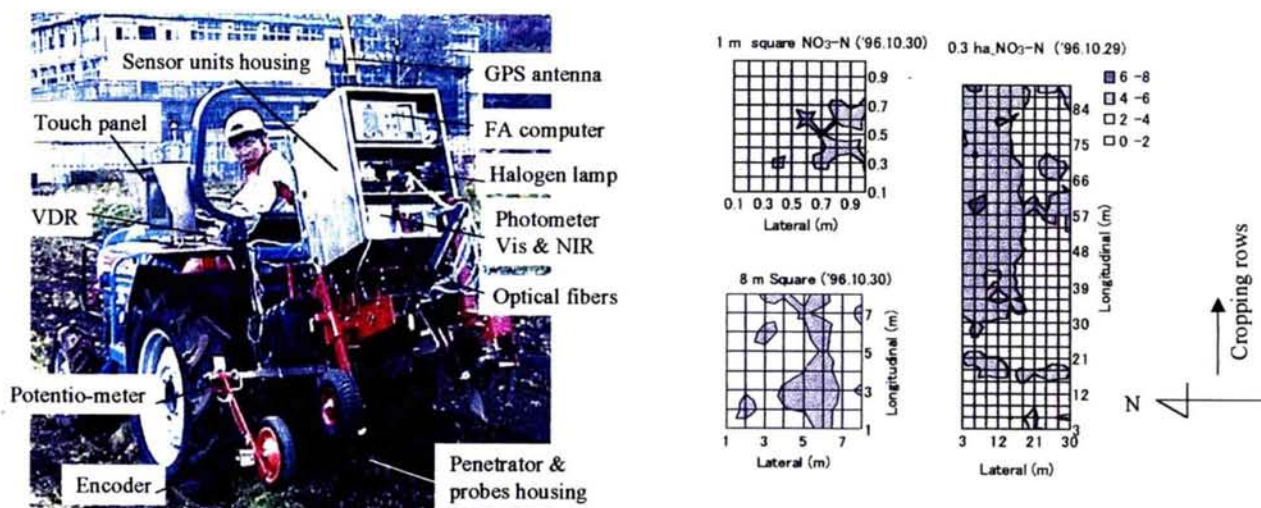


図 4-6 精密農法における計測システムとフィールドマップの例⁴⁾

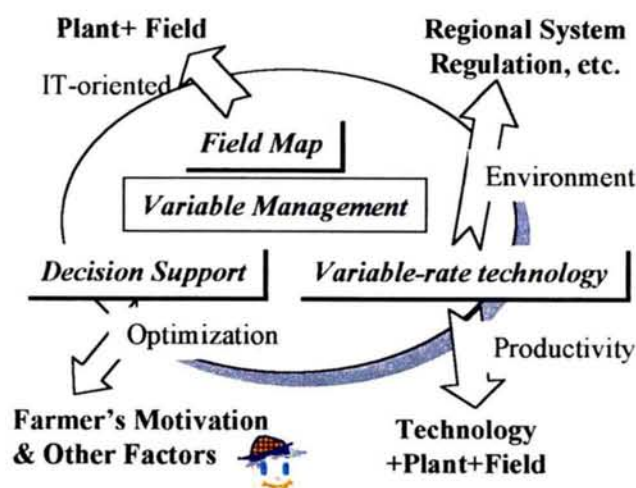


図 4-7 精密農法における可変的管理システム概念図⁴⁾

洪澤は精密農法の一例として、図4-6のトラクターに土壤の吸収スペクトル自動測定装置と測定結果から土壤中の化学成分の濃度を深度毎に判定する装置、および GPS により地図データとしてマッピングする方法を紹介している。

この計測装置によって得られたマップは、農家が収穫量を最大化のため地点別の肥料添加量決定の、また環境保全を行うための方策決定の支援材料となり、さらには経時的な改良管理に用いられる。精密農法では、これを可変的な管理システムと称しているが、その概念は、図4-7に示すとおりである。

精密農法は、大規模農場での区域毎の肥料の量と収穫量の関係を経年的に整理し、経験に基づいて肥料の量を決定したことを原点とするが、IT技術、計測技術の利用により高度な可変的管理を目指しているといえる。

(2) 精密地盤改良システムの概念

一方、ReSM工法では、発生量・埋戻し量（収量メータ付きコンバインによる収量マップに相当）、強度（リモートセンシングによる作物情報マップに相当）、単位体積重量・フロー値（土壌サンプリングに相当）を発生・埋戻し工区毎の日常管理表として作成・管理したが、これらのさらなる高度化、システム化を前提に、精密農法との対比で精密地盤改良システムと称するものである。

精密地盤改良システムは、図4-8にその考え方を示すように、発生および改良対象の複数工区からなる発生土有効利用マップ（データベース）を作成し、とくに発生工区内における地盤材料のバラツキに対応したきめ細かな管理を実施するものであり、これらを本格的に行うためには計測技術の高度化、計測したデータの電子情報化、およびこれらを用いた現場での生産性の効率化が必要となる。

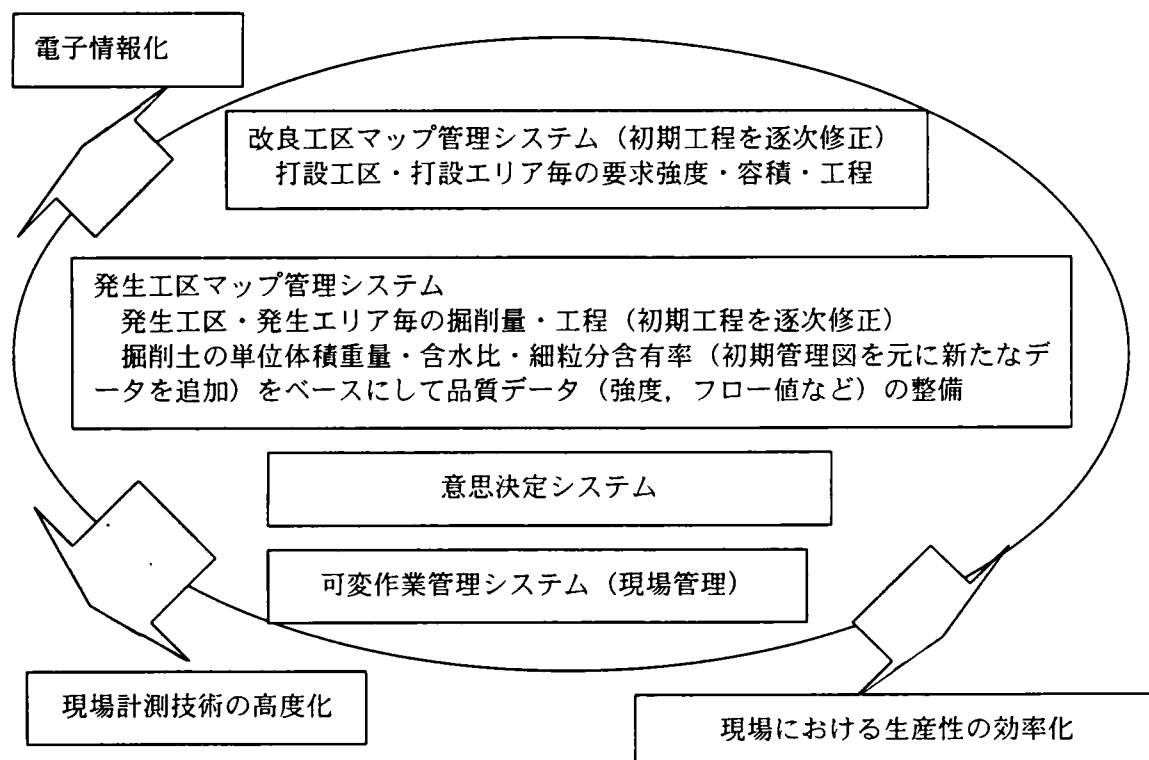


図4-8 精密地盤改良工法の可変的管理システム構成概念図

精密農法、ReSM工法および精密地盤改良システムの比較を表4-1に示す。

これにも示すように精密地盤改良では、これまでのReSM工法で不十分であった計測装置、運搬システムのIT化を核に、改良プラント毎の強度管理、リアルタイムでの運行管理、多品種の同時改良管理など高度で柔軟な可変型管理を目指している。

表4-1 精密農法、ReSM工法、精密地盤改良システムの比較

	精密農法	ReSM 工法	精密地盤改良システム
概要	計測機器、IT 技術を用いた収穫量最大化、環境保全のための肥料添加量の可変的管理システム	事前配合試験、および3・7・28日強度と各種計測データの関連、蓄積データをデータをもとに、改良強度のバラツキの最小化を目指した経験的管理システム	計測機器、IT 技術を用いた有効利用最大化、環境保全のためのセメント添加量の可変的管理システム
目的	収穫量最大化、環境保全、コスト削減の実現	改良強度のバラツキの最小化	複数工区における改良強度のバラツキの最小化、環境保全、コスト削減の実現
計測内容	土壌の化学成分、水分量など	単位体積重量、加水・セメント添加後の泥水比重、フロー値、ブリージング率、3・7・28日強度など	単位体積重量、含水比、細粒分含有量、粘土成分、加水後の泥水比重、粘性、粘性、ブリージング率、セメント添加後の粘性、予想強度、3・7・28日強度など
IT 技術	GPS、吸収スペクトル計測による土壌成分判定システムなど	電話・無線による連絡システム、コンピュータによる既存データベースの作成と利用	単位体積重量、含水比、細粒分含有量、粘土成分などの自動計測装置、GPS などによる自走式プラント運行管理システムなど
フィールドマップの内容	圃場のエリア別化学成分分布図など(1年毎にフィードバック) (空間上のマップ)	発生・打設工区の予定表 経時的な土質性状(単位体積重量など)の測定データ 掘削工程と発生土掘削地盤図 発生土別の加水量、セメント添加量、 打設工区別の改良強度(1日1回以上)など (3・7・28日毎、および毎日フィードバック) (時系列上のマップ)	発生側・利用側の情報(性状、要求品質、量など) 自走式プラント運行マップ 土質性状に合わせた配合計画 自走式プラント毎の処理土の改良強度 経時的な土質性状(単位体積重量など)の測定データ 発生土掘削地盤図 (3・7・28日毎、および毎日フィードバック) (空間上、時系列上などでのマップ)
管理内容	既存データをもとに農家が判断	試験データ、既存データをもとに管理者が判断	計測データをもとに自動的に判断
フィードバック方法	収穫予想による追肥	3・7・28日強度による配合修正	予想強度、および3・7・28日強度による配合修正

(3) 可変型管理システムの概念

図4-6に対応する ReSM の計測データを図4-9に示す。

精密地盤改良では、事前試験数が少なく、初期において強度のバラツキが大きい場合でも、計測データを蓄積することで誤差を補正しつつ、2層目、3層目になるに従い次第に均質な地盤を構築し、かつ地盤全体では目標強度となることを目指している。

4. 3 ロジスティックシステムとリスクマネジメントの考え方

前節に述べたReSM工法による精密地盤改良システムを具体化するためには、それを構成する次の4つのサブシステムを完結させる必要がある。

- ① 発生工区マップ管理システム
- ② 改良工区マップ管理システム
- ③ 意思決定システム
- ④ 可変作業管理システム

これらについて、ReSM工法の現状と今後の検討課題を整理する。

また、本節のロジスティックシステムや前述の精密地盤改良システムの考え方に関連するものとして、筆者の関心の高いテーマとしてリスクマネジメントの概念をここに反映させてみた。

4. 3. 1 施工管理の考え方

(1) 強度管理

上記4つのサブシステムのうちもっとも重要で基本的なものが③意思決定システムで、日常的な配合決定の考え方に集約される。発生土の有効利用に先立っての基本配合表、水・セメント比～一軸圧縮強度関係図の作成、および稼働期間中の日々の施工管理のデータが配合決定の基となるが、ReSM工法のようなソイルモルタルの一軸圧縮強度 q_u は、単位体積当りの原材料の細粒分含有量 F_c 、水分量（含水量＋加水量） W_w 、セメント量 C により決定される。

$$q_u = f(F_c, C, W_w) \quad (4.4)$$

本来ならば、想定土質材料の全てについて、それぞれの土質材料の細粒分含有量、含水比毎に設計 q_u を満たす加水量、セメント量を決定し、 F_c 、 W_w 、 C 軸上での一定の一軸圧縮強度平面を作成し、土質材料の F_c およびセメント量 C から目標強度を満たす水量を見出し、土質材料の含水比から加水量を決定するという配合設計手順をとるべきであるが、このような配合設計基準を作るためには膨大な事前試験が必要となり現実には対応できない。

また現場での施工において、発生土の全てについて1バッチ単位毎に細粒分含有量や含水比を測定することは効率的でない。

このことから著者らは、図4-10に示すように、

- ① 初期の配合設計は砂質土系、粘性土系について目標強度を満たす基準配合のみを決定（ただしセメント・水比が強度をほぼ決定するように加水量を設定。この時、3日～7日強度関係図、7日～28日関係図を作成しておく）
- ② 発生土を砂質系か粘性土系で判定し加水量を決定（細粒分含有量・含水比を砂質土系・粘性土系で区分し、目標強度を満たすセメント量から加水量を決定）
- ③ ソイルモルタルの単位体積重量から当初の含水比の範囲を確認

- ④ ソイルモルタルがフロー値・ブリージング率の基準を満たすことを確認
 - ⑤ 3日強度から28日強度が目標強度を満たすかどうかを予測
 - ⑥ 強度を満たさない可能性がある場合は、セメントの増加または加水量を低減
- というフィードバック管理方式で施工しながらデータを蓄積していく、知識データベース管理方式を導入した。

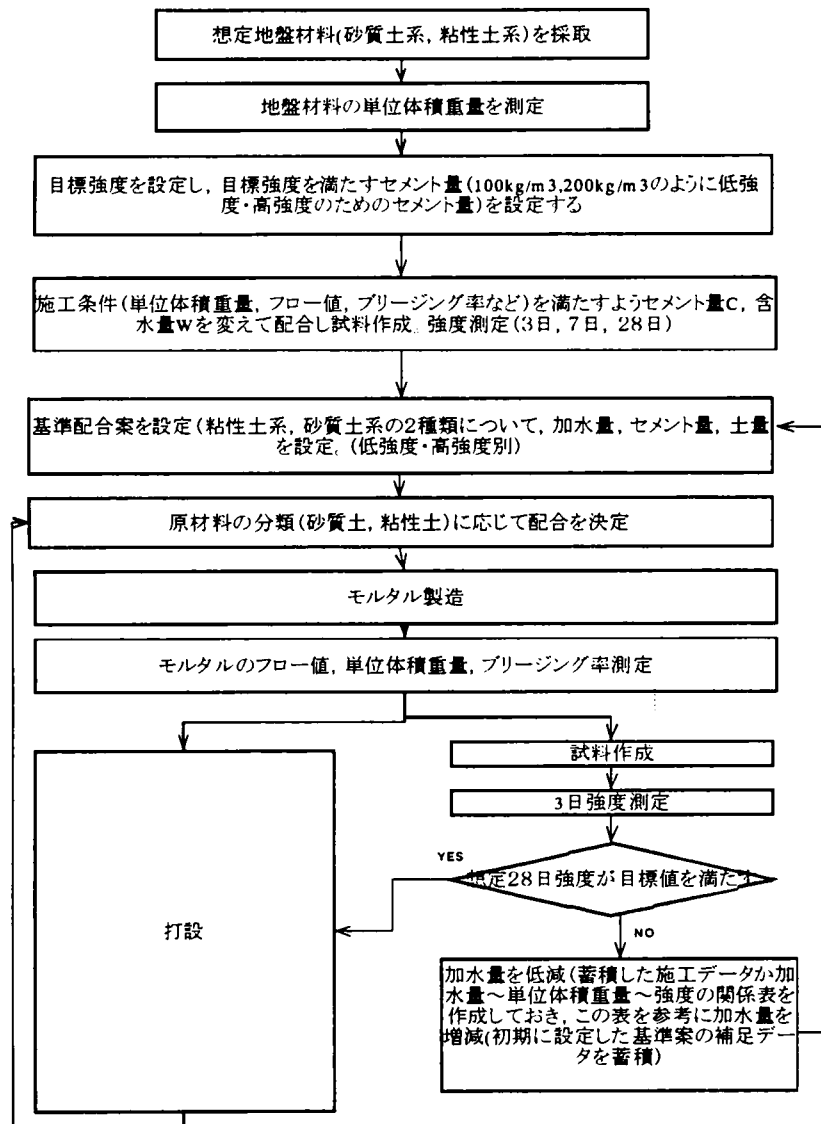


図4-10 フィードバック式・データ蓄積型配合設計管理方式

この方法は、施工実績が蓄積されるに従って強度のバラツキが小さくなるという特徴を持っている。このように施工初期や発生土の材料特性が大きく変化した場合には強度のバラツキが多少大きくなる懸念があるが、第3章でも詳述したように、図4-11のような全体

強度の管理図を用いて、地盤全体として目標強度を満たすような管理を試み、一定の成果をあげることができた。

図4-11は、横軸に打設量の累積値を、縦軸に打設量×一軸圧縮強度の累積値を示し、この傾きがこれまで打設した改良体の平均強度を示す。この管理図上に施工開始直後からそれぞれの累積値をプロットしていくことで、改良地盤のマスとしての平均強度が目標値を満たしていることを確認することができる。この場合合同図において、例えば1日目の強度が目標より低くなっているが、鋼材やコンクリートのように部分的な変形や破壊が性能欠陥や系全体としての破壊に結びつく場合とは異なり、ソイルモルタルによる人工地盤の構築においては、4.2.2でも述べたようにマスとしての平均的な物性が問われることになる。ただ、平均的な物性と言ってもほとんど全てが目標以下で、一部非常に高い強度をもたせて結果的には平均強度が目標値を上回っているような場合には、この考え方は適用できない。

この考え方を累計確率を用いて模式的に示すと、例えば図4-12において安定しているケースが(2)、不安定なケースが(1)となる。もちろんこれらの変動は、通常の管理でも把握できるが、ReSM工法のように日々の結果をソイルモルタルの作成にフィードバックさせるようなシステムの場合、さらにこの考え方のメリットが活かせることになる。

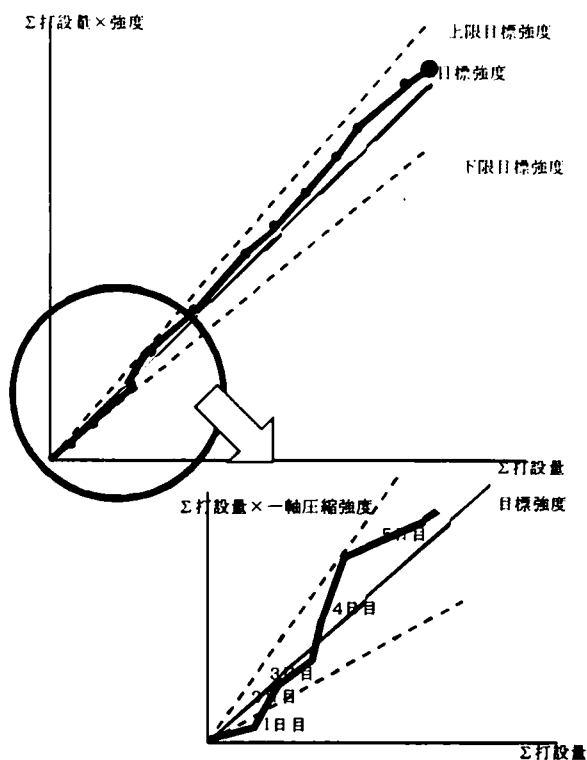


図4-11 平均強度管理図

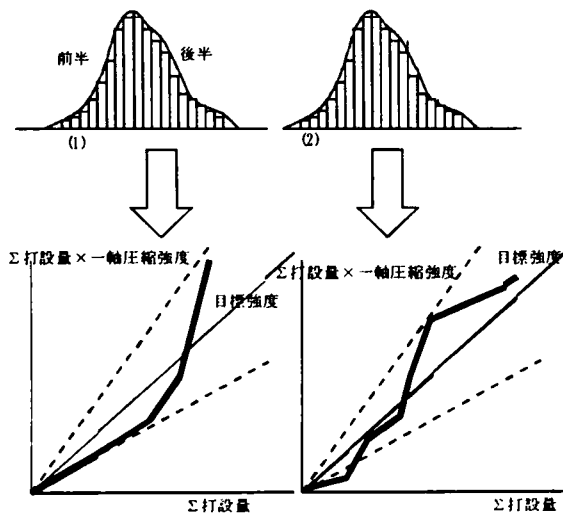


図 4-12 日々の管理の安定性の模式図

(2) 物流管理

一方、精密地盤改良システムの4つのサブシステムのうち、前述の③意志決定システムを除く3つのシステム、即ち、①発生工区マップ管理システム、②改良工区マップ管理システムおよび④可変作業管理システムは、いずれも物流管理に関するシステムとなるが、3章で述べた大阪地下鉄工事でのシールド発生土を用いたReSM工法埋戻しの施工管理に採用した、そのシステムの管理帳票事例として表4-2に配合管理表を、表4-3にミキサー車の稼働管理表をそれぞれ示す。ReSM工法では、運搬ミキサー車が製造プラントを兼ねるため、ミキサー車の稼働管理表が、発生工区からの運搬量、製造量、発生土掘削および埋戻し工程等の管理を行うものとなる。

表 4-2 配合管理表 (例)

月 日	埋戻し数量	配 合 (m3当たり)			土砂比重 (泥土)	土砂供給工区		埋 戻 し 工 区		R e S M 試験値			圧 縮 強 度 (Kg/cm2)		
	m3	セメント(Kg)	土砂(m3)	水(litter)		工 区	土砂種類	工 区	数 量	比 重	フロー値	材令3日	材令7日	材令28日	
96/11/12	70.0	200	0.517	420		搬入土	粘性土	18	25.0	*****	*****	*****	*****	*****	
96/11/13	10.0	200	0.517	420		搬入土	粘性土	18	25.0	*****	*****	*****	*****	*****	
96/11/13	15.0	100	0.586	382		搬入土	粘性土	18	65.0	*****	*****	*****	*****	4.7	
96/11/14	110.0	100	0.586	382		搬入土	粘性土	18	70.0	*****	*****	*****	*****	4.2	
96/11/15	70.0	100	0.586	382		搬入土	粘性土	18	80.0	*****	*****	*****	*****	4.4	
96/11/16	50.0	100	0.586	382		搬入土	粘性土	18	80.0	*****	*****	*****	*****	*****	
96/11/18	70.0	100	0.586	382		搬入土	粘性土	18	60.0	*****	*****	*****	*****	2.1	
96/11/19	100.0	100	0.586	382		搬入土	粘性土	18	90.0	*****	*****	*****	*****	5.0	
96/11/20	100.0	100	0.586	382		搬入土	粘性土	18	60.0	*****	*****	*****	*****	*****	
96/11/21	100.0	100	0.586	382		搬入土	粘性土	18	80.0	*****	*****	*****	*****	*****	
96/11/22	60.0	100	0.586	382		搬入土	粘性土	18	45.0	*****	*****	*****	*****	*****	
96/10/28	30.0	200	0.517	420		搬入土	粘性土	18	50.0	*****	*****	*****	*****	*****	
合 計	785.0								710.0						

表4-3 ミキサー車の稼働管理表(例)

月日	埋戻し数量 m ³	土砂比重 (泥土)	土砂供給 工区	埋戻し 工区	土砂関係 稼働台数	延台数	稼働時間 開始時間	終了時間	稼働時間	5~8	8~17	12~13	17~20	20~5	稼働率 (台/台時)	稼働率 (台/台時)
98/11/12	70.0				14		8:00	17:30								
98/11/13	10.0				2		8:00	17:30								
98/11/13	15.0				3		8:00	17:30								
98/11/14	110.0				22		8:00	17:30								
98/11/15	70.0				14		8:00	17:30								
98/11/18	50.0				10		8:00	17:30								
98/11/18	70.0				14		8:00	17:30								
98/11/19	100.0				20		8:00	17:30								
98/11/20	100.0				20		8:00	17:30								
98/11/21	100.0				20		8:00	17:30								
98/11/22	80.0				12		8:00	17:30								
98/10/28	30.0				8		8:00	17:30								
合 計	785.0				157											

月日	埋戻し数量 m ³	配 合 (m ³ 当たり)	土砂比重 (泥土)	埋戻し工区・数量	土砂供給工区・数量
		C=100 C=200 C=225 C=275 C=300 その他	土砂(m ³) 水(liter)	15工区 16工区 17工区 18工区 19工区 20工区	15工区 16工区 17工区 18工区 19工区 20工区
98/11/12	70.0		0.517 420		25.0
98/11/13	10.0		0.517 420		25.0
98/11/13	15.0		0.588 382		65.0
98/11/14	110.0		0.588 382		70.0
98/11/15	70.0		0.588 382		80.0
98/11/18	50.0		0.588 382		80.0
98/11/18	70.0		0.588 382		80.0
98/11/19	100.0		0.588 382		90.0
98/11/20	100.0		0.588 382		90.0
98/11/21	100.0		0.588 382		90.0
98/11/22	80.0		0.588 382		45.0
98/10/28	30.0		0.517 420		50.0
合 計	785.0			710.0	

ReSMソイルモルタルの製造品質管理を精密に行うのであれば、この他に掘削土の含水比・細粒分含有率などが必要であるが、この管理表では、月日、埋戻し数量、土砂種類、土砂比重、埋戻し工区および数量、土砂供給工区および数量、ミキサー車稼働時間、稼働率、配合結果(セメント添加量(m³), 土砂量(m³), 水(liter))、ReSM比重及びフロー値、圧縮強度(3日, 7日, 28日)を管理項目として記載されており、上記3つのサブシステム情報が必要最小限データ化されることになる。

4.3.2 ロジスティック管理システム

建設物流や静脈産業物流といった分野で注目され出しているロジスティックは、一般の物流においては常識となりつつある小売店舗の販売情報を起点にした、供給連鎖のプロセスの最適化を目指しているが、手法として例えばジャストインタイム方式などもその一例で、それらを総称してサプライチェーンマネジメント(SCM)と称している。

一方現実的には、発生土有効利用と中間処理における定置式プラントにおいては需給のアンバランスが常態化し、結果として製品化前の多量の材料(発生土)に対し大きいストックヤードを必要とするため、材料ストックという面でSCMシステムとはいえない。これに対しReSM工法による物流は、発生側が製品化し納入するという考え方であり、ミキサー車を連絡・待機させた状態で限られた時間ストックしているのみで、製造後数時間程度で需要側で打設しなければならず、例えばできるだけ早い運搬ルートを確認するためモバ

イル機器による交通混雑に伴う輸送コントロールを行うことが必要となる。特に輸送車自体が加工プラントであるReSM工法では、空車状況と改良土の需要供給データの統合を一つのシステムで行うことでコストの低減を図ることができる。

このような製造・運搬コストの最適化は、複数目的地の情報が集まれば従来の計画問題で解くことができるが、現実的な運用に当っては、GPSなどを駆使してIT化による最新情報を更新しながら、配車やルート of 逐次探索を行うことで十分に対応することができる。

発生土側および改良土需要側の物流・輸送システムと情報システムとしては、図4-13のように情報拠点に情報を集約し、インターネット上で全ての発生現場・使用現場から情報を見られるようにするとともに、発生側と需要側の数量や工程の調整、改良方式、輸送手配などを行うこととし、これらの情報は関係する全ての担当者が読み取れるものであることが効率的運用において欠かせない。

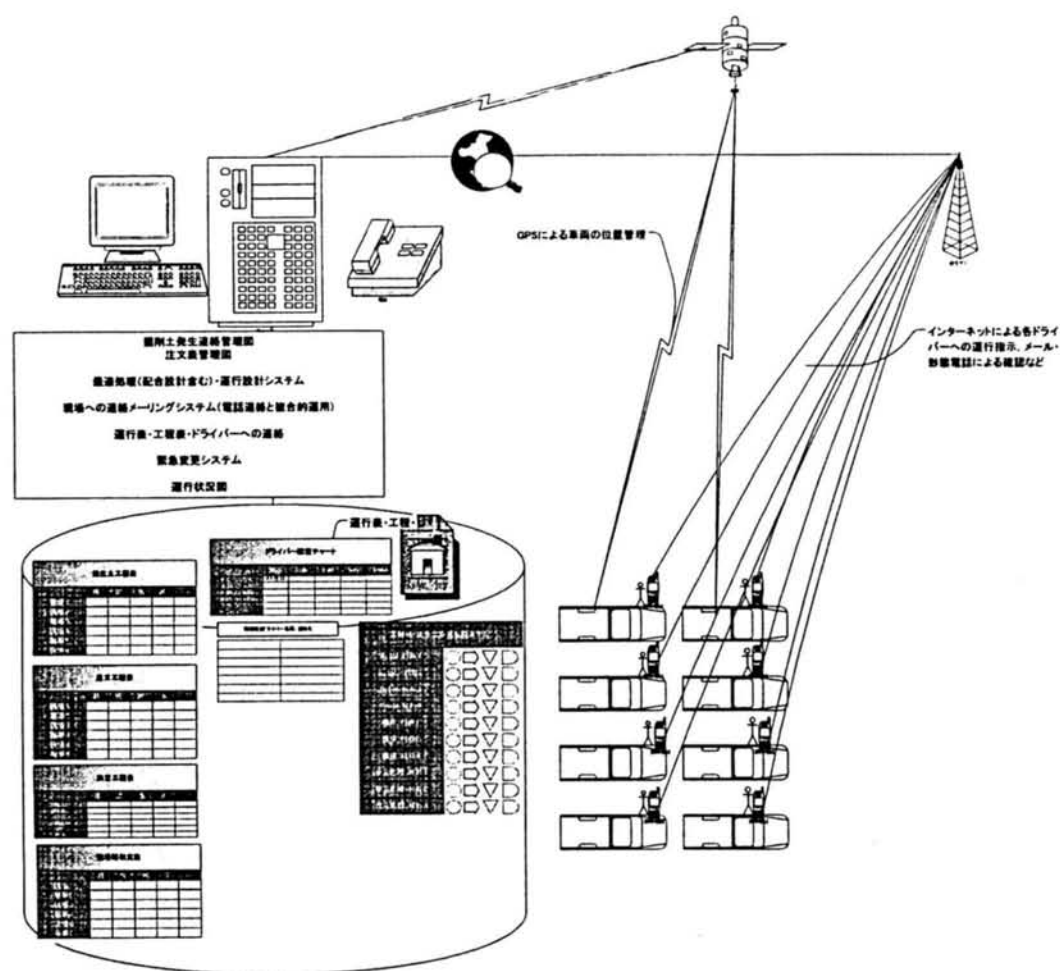


図4-8 情報システムとしての施工管理システム

すなわち、意思決定システムとしての事務所で、発生現場および埋戻し現場からの発生量・埋戻し量の情報の一元化（週間予定，前日確認，当日確認）により各現場間の調整を行い、ミキサー車の配車計画を立案し各ミキサー車に連絡するとともに、発生現場に配した管理者により発生土およびソイルモルタルの性状の連絡を受け、これまでの配合の変更の必要がある場合は、その対応を行うことになる。また 1 日 2 回、ソイルモルタル試料を作成したものを事務所に収集し、強度試験がなされる。

以上のように、ReSM工法における SCM システムは、改良土の供給側と需要側双方のジャストインタイム方式を同時に満たすことであるといえるが、そのためには、個々の需要側にとっての、図4-9に示したようなマップ化された精密地盤改良情報の共有が極めて重要となろう。

4. 3. 3 リスクマネジメント ^{5), 6), 7), 8)}

近年において、いろいろの機会に「リスク」という言葉に接することが日常的になってきている。また、最近社会資本整備の民営化手法のひとつとして注目を浴びている PFI（Private Finance Initiative）においても、リスクの考え方がきわめて重要である。筆者も PFI については、オーストラリアでのシドニーハーバー・トンネル事業 ^{9), 10)} 他の実績を踏まえて、内閣府の政府委員を務めるなど多くに関与し、リスクマネジメントについても多大の関心を抱いているところである。

一方、筆者らが本論文で提案するソイルモルタルを用いての精密地盤改良工法や新しいロジスティックの考え方は、それに伴うリスクのあり方と裏腹の関係にあり、そのマネジメントはきわめて重要になる。

ここでは、リスクマネジメントの概要と、ソイルモルタルによる地盤改良への考え方について述べておきたい。

（1）リスクマネジメントの概要

リスクマネジメントにおけるリスク評価のプロセスは、一般的に図4-14に示す通りである。この図にもとづきその主要なプロセスの考え方について以下に触れておきたい。

（a）リスクの分類と抽出

リスクを論じる際、事業期間の長さおよび経時的多様さや、関連組織間の業際的複雑さなどの特徴から多種多様のリスクが潜在することになる。ある側面だけではなく、いろいろの切り口でリスクを分析し、評価していくことが要求される。そのいくつかの切り口と、それにもとづくリスクの分類については以下の通りである。

① 参画者別リスク分類

- ・発注者（管理者）リスク
- ・事業者（スポンサー）リスク
- ・専門業者（請負・下請）リスク

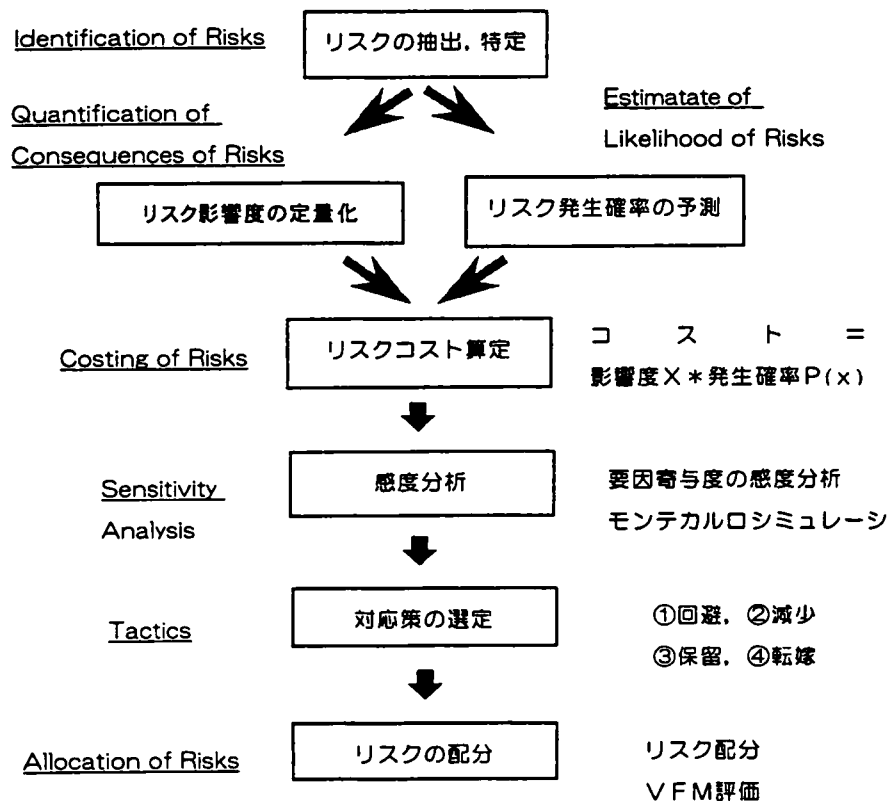


図4-14 リスク評価手順

- ・政府公共機関（広義には住民）リスク
- ・融資者（ファイナンシアー）リスク
- ② 時系列的リスク分類
 - ・計画・交渉・事業組成段階
 - ・施設の設計・建設段階
 - ・運営・維持管理段階
- ③ 事業リスク分類
 - ・完成リスク（工期・事業費・品質等）
 - ・生産リスク（施設の稼働・維持管理等）
 - ・市場リスク（需要予測と実際）
- ④ 起因別リスク分類
 - ・経済的起因（物価・金利・為替・関税等）
 - ・政治的起因（各種法令・税制・政権交代等）
 - ・社会的起因（労働問題・地元・環境問題等）
 - ・自然現象的起因（地質・気象・災害等）
 - ・技術的起因（信頼性・安全率・技術革新等）

- ・パートナー起因（信頼性・経営基盤等）
- ・チーム・人的起因（リーダー・コンサル）

以上のように、リスクの評価はいくつかの切り口で分類されるが、その影響度や発生確率に係わらずプロジェクトに関する全てのリスクを漏れなく列挙していくことになる。そのためにはブレインストーミングやKJ法といった発想技法なども有効なツールとなろう。

（b）リスクの分析

このようにして抽出、特定されたリスクについて、その起こるだろう確率（リスク発生確率）とそのリスクが具現化した際の対策費または損害の大きさ（量的リスク影響度）という、いわば負の期待値を分析し、図4-14に示した流れに沿ってリスクの配分までを評価していくことが求められる。

リスクの分析においては、上述のその影響度や確率を含めて下記の項目について検討することになる。

- ・発生確率（発生の可能性）
- ・影響度（リスクのコスト）
- ・範囲と分布（楽観ケースと悲観ケース）
- ・相関性（他のリスクとの関連：相乗・相除）

特定されたリスクについて、これらの項目に基づいて分析した結果がリスクマトリックスとして整理され、定量化と分担、およびその対応策が議論されていくことになる。あるリスクについての定量的評価は、それが発生したときの金銭負担 X とその発生確率 $P(x)$ の積で示される。いわゆる負の期待値である。この場合発生確率についても、後述のようにリスクごとに範囲と分布形があり、経時的にも変化する。

また、このように分析されたリスクについて、筆者は、その程度が予測ができ金銭的に評価できるもの（費用で解決できる）を原価リスクと称し、一方予測が難しく金銭的には解決できないもの（出来るとしても天文学的な数字となるもの）を絶対リスクと称して、リスクを2つのタイプに分けてリスクマネジメントの議論を展開している⁵⁾。リスクの発生確率と影響度の関係では、確率が高いが影響度があまり大きくないケースは前者に属し、確率は極めて小さいが影響度は計り知れないケースは後者に属することになるだろう。

（c）リスクマネジメント

これまで述べてきたことから解るように、多くのリスクは事業関係者間でゼロサムであり、相対的なものである。一つの組織がリスクを回避するとそれ以外の関係者がそれを分担することになるが、それぞれのリスクに対する対応策は立場によって異なることもある。ここでは、過半のリスクを受け持つ民間事業者にとっての対応の仕方、すなわちリスクマネジメントについて述べておきたい。

一般的にリスクに対する対応策としては

- ① 回避（Avoidance）
- ② 減少（Abatement）

③ 保留 (Retention)

④ 転嫁 (Transfer)

の4種類に分類される。

このうちいずれの対応策を適用するにしても、それには当然費用が発生することになり、他の投資と同様費用対効果が重要となる。リスクに対して安全であればあるほどコストがかかるということである。その点を考慮して、この四つの対応策について簡単に触れておこう。

① 回避策

回避策しか取れないリスクは、いわばオール・オア・ナッシングである。したがって事前に十分検討され計画段階で回避されたリスクは、もはやリスクでなくなる。逆に言えば、もしこのタイプに属するリスクを見逃した場合には、将来においてコスト増では解決できないほどの重大な結果を招くことになる。

② 減少策

これには、生起確率を減少させる策と、起こった場合の結果の重大さを減少させる策の二通りがある。例えば、盗難防止警報装置を取り付けることは前者で、スプリンクラーシステムを装備することは後者である。この策はコストとして確定するが、それにより保険コストを削減できる効果もある。

③ 保留策

起こる可能性はあるが、当面それに対する事前防止策は採らないで、起こったときに対処しようとするものである。この策の前提としては、たとえ起こっても大きな影響はなく解決できること、それに必要なコストを予算として見込んでおくことが挙げられる。もし起こらなければ、その分だけコストセーブ出来ることになる。

④ 転嫁策

リスクを他に転嫁する策で、工事契約でリスクを下請け業者の責任とする場合や保険でカバーしようとする策である。転嫁される側は、そのリスクに対応するためのコストが必要であるから、その分だけ高い契約になるが、発注者としては事業の初期段階でコストの不確定部分を減らせるというメリットがある。

(2) 各段階におけるリスクマネジメント

以上述べてきたように、リスクマネジメントとは、ある事象に対して図4-14にも示したフローにしたがってリスクを管理することであるが、とくに後述のような建設発生土を用いてのスーパー堤防構築などの事業では、様々な要素が複雑に関係し、時間的にも極めて長期にわたるため、それらのリスク（未知数）をどう抽出し、それぞれに対する対応の仕方（方程式）をどう確立していくのか、まさに多元高次方程式を解くに似たプロセスが要求される。

これらについては、調査・設計・施工の段階のみならず、そのきわめて長い運用期間に

ついでにの視点も重要となる。いずれにしてもそれらのリスクに対応していくためには、本章で述べてきた精密地盤改良の仕組みやそのロジスティックの考え方の中に、リスクマネジメントという今ひとつのシステム（方程式）を導入していくことが求められる。スーパー堤防といった極めて重要な施設について、未知数の数に対し方程式の数が整わないといった、不静定な状況のまま問題を先送りすることは許されないということである。

これまで展開してきた汚泥を含む建設発生土の有効利用の議論は、上記リスクマネジメントでいえば、時系列的リスク分類では人工地盤構築の調査・設計・施工および運用のすべての段階に係わるものであり、起因別リスク分類では社会的・自然現象的・技術的起因に類するものである。

ここでは以上のような視点に立って、調査・設計から施工、運用に至る段階での、リスクマネジメント的な課題について簡単に触れておきたい。

（a）調査段階

有効利用をもくろむ建設発生土の材料特性（粒度分布、細粒分含有率、粘度鉱物特性、含水比等）の調査試験の精度がリスクに及ぼす影響の評価について、

① 様々な調査試験から得られる地盤物性値の工学的評価

② 調査試験の数量とバラツキの評価

③ 地質分布状況と発生材料の質的、量的バラツキの評価

などがあげられる。これらの項目に対する評価結果の違いが、改良材料の品質、施工性、施設の安全性等、最終的な経済性を含め大きな影響を及ぼすことになるが、もっと費用をかけて調査試験を詳細化する方がリスクが低減でき、最終的に経済的になるのか、地盤改良に限らず、建設工事に係わる技術者として重大な関心事となる。

（b）設計段階

ソイルモルタル等改良材を用いて構築された人工地盤にとって最大のリスクは、その関連構造物を含めそれが破壊し機能を失い、場合によっては他に多大な被害を及ぼすということであろう。破壊確率をどう評価するかが問題であるが、本章4.2にも述べたように、構造物設計法の違いから安全率は必ずしも同一とならないと考えられる。

また、仮に安全率を統一して設計したとしても、各々の構造物の不確実性は異なっており、全体としての破壊確率に影響を及ぼす。構成要素の安全率とリスクアナリシス上の破壊確率とは別の視点が必要となる。

一方設計は、構造物としてのハードの視点だけではなく、それを利用するサービスや安全性の維持といった、いわゆる性能設計的な面も重要となる。阪神大震災を契機に、土木・建築構造物の設計法は許容応力設計法から限界状態設計法、さらには性能設計法へと移行しつつあるが、地下構造物については必ずしもその範疇ではない。構造物の性能要求とリスク分析が前面に押し出された議論が待たれるところである。

（c）施工段階

施工段階に関しては、施工精度や品質のバラツキが安全率や破壊確率に及ぼす影響と、

それ以外の施工管理上の不具合によるリスク要因とに分けて考える必要がある。

前者については、改良材料のフロー値や強度等品質のバラツキそのものであろうし、後者についてはたとえばソイルモルタルの運搬方法や運搬時間、現場での打設方法や施工のプロセス、さらには施工後の養生も含めた工事期間中の維持管理の問題等、広範な視点が必要である。

(d) 運用・維持管理段階

完成後何十年にもおよぶ施設の運用期間において、その性能や安全性は設計段階で考慮された様々な人為的、自然現象的リスク要因に対応していくことになるが、それらのリスクが具現化したときの被害の大きさに対応した日常的なマネジメントが重要となる。

(3) 精密地盤改良システムへの展開

以上述べたようなリスクマネジメントの考え方を、ReSM工法等による人工地盤構築に適用する際、これまで述べてきた精密地盤改良とそのロジスティック的なシステムにとの関連で、以下のようないくつかの点が重要な視点となる。

(a) 品質管理のフィードバックシステム

精密地盤改良システムの考え方のひとつに、限られた発生土側の地盤情報をベースに標準配合された改良材料を、施工過程においてきめ細やかな管理を行い、集積されたデータを逐次その後の配合へと反映させていくというプロセスがある。このようなプロセスにより、人工地盤としての機能を満たす平均強度を中心としてのバラツキを最小化し、必要セメント量を最小化しようとするものである。

現時点では、含水量の計測や強度試験結果の反映に時間が掛かり、その分のリスクを予め見込んでおく必要があるが、測定方法の開発等によってそれを補完できるような仕組みが今後の課題である。

(b) マスとしての考え方

ソイルモルタル等改良材による人工地盤は、相応のボリュームを有するマスとしての構造物となるため、鋼材やコンクリート構造物のように部分的な変形や破壊が性能欠陥や系全体としての破壊に結びつく場合とは異なってくる。斜面すべりや側方流動さらには圧密沈下といった系全体の変形・破壊モデルを前提にしながら、上記(a)に述べたきめの細かい管理と逐次その反映を繰り返すことにより、リスクを最小化し、経済性を追求することが可能となる。そのための一つの手法として、これまでも述べてきた累計確率的な考え方が有用となろう。

(c) ロジスティックシステムの導入

ReSM工法等今回の議論の今ひとつの視点は、自走式プラント（具体的には改造生コンクリート車）を用いての、建設残土発生側でのソイルモルタル製造と品質の管理である。廃棄物の発生現場が、それを有価物に替えて搬出するという点でも、廃棄物処理法に即した考え方であり、システムである。納入側がその品質を保証して搬入するというのが大

前提となるが、そのために前項でも述べたきめの細かいロジスティック管理システムが要求される。IT化による最新情報を1台1台の生コン車が共有し、需要側の要求を反映しながら対応していくためには多くの方程式が必要となる。そのシステムの試行錯誤的改善経過の持つリスク等は、今後の課題である。

(d) 情報管理とリスク対応

上記(c)にも関連するが、IT技術を用いてのきめ細かい情報管理で得られたデータの共有は、施工期間中のリスクマネジメントだけでなく、その施設が運用され供用された段階での種々のリスクを分析し、対応策に反映するために極めて重要な視点となる。

そのためには調査・設計、施工さらには運用の各段階での不確実性やそれに係わる様々なリスクを分析し、その起こる確率や影響の大きさの定量化が重要となるが、現状では必ずしもそれらのデータが蓄積されている訳ではない。IT化による情報の蓄積は可能であっても、それらを定量化し、例えばモンテカルロ法等により確率解析を行えるまでにはかなりの時日を要することになるだろう。

TQC等でいう“Vital few, trivial many.”（本当に重要なものはほんの一握りで、多くは取るに足らないものである）ということで、影響度の大きい（vital）リスクの定量化は精密地盤改良システムのキーとなろうが、このような致命的なリスクについてのデータの蓄積が焦眉の課題である。

4. 4 スーパー堤防構築への適用に関する一考察

(1) オール廃棄物リサイクル堤防構築の考え方

極めて大規模な盛土工事である高規格堤防（スーパー堤防）は、乾燥・含水比調整→撒きだし→転圧というプロセスをとるが、粘性土を多く含む土質では、セメント系や石灰系の固化材で改良しながらというケースもある。第1章1.3.2(2)にも紹介した江戸川堤防整備事業では、綾瀬川放水路建設工事の発生土 130 万 m^3 について、1年間ストックヤードで天日乾燥・脱水処理を行った後、現地においてさらにセメント系固化材でトラフィカビリティを改良しながら盛立てを行った例である。

これらの対応は、制度的には「再生利用認定制度」によっており⁵⁾、汚泥などの再利用は、“シールド工法または開削工法を用いた掘削工事、杭基礎工法、もしくは連続地中壁工法に伴う掘削工事または地盤改良工法を用いた工事に伴って生じた無機性のものに限り”汚泥を、高規格堤防の築堤材として、地表から 1.5m 以深の部分に用いるものと限られている。

ただ上記の考え方は、いずれも固化改良した材料を埋立てることを前提にしており、流動化処理土による方法については定かでない。ここでは ReSM ソイルモルタルをスーパー堤防に応用するための可能性を探ることとする。

図4-15に示すスーパー堤防計画断面にを例に、まず河川から離れる側の住宅や準工業地域においては、原則的に民有地であることもあり、将来の地下室増築や中高層化のための基礎杭打設などの可能性を考慮し洪積地盤相当の均質な盛立て区間となる。施工法としては、大量のソイルモルタルを打設するという考え方である。

これに対して河川に近い側については、堤防の一部として深さも大きく、かつ上部は公共用地として公園や道路に供される部分として将来掘り起こされる可能性の少ない区間である。この区間におけるある深さ（例えば 1.5m）以深について、

- ① 化学的に汚染されていない
- ② 洪積地盤相当以上の強度を有する
- ③ ほぼ永久的に変質しない

などの条件を満たす「健全な産業廃棄物」を埋立てに使用し、その最終処分を兼ねるという考え方である。それらの材料としては、建設廃材であるコンクリートやアスファルトガラや木片、陶器・ガラス片などがあげられるが、粉碎したり粒度を調整するなどの2次加工は原則として不要である。

これらの廃棄物が埋立てられた空隙部をソイルモルタルで充填し、全体として廃棄物～ソイルモルタル複合地盤を形成しようというものであるが、その方法として以下の2通りが考えられる。

- ① 上記のような様々な廃棄物が埋め戻された後、流動性の高いソイルモルタルでそれらの間の空隙を充填する。ソイルモルタル量は少なくても済むが、空隙が残る可能性もある。木片などは浮力で浮きあがらないようコンクリートガラで抑えられている必要がある。
- ② ソイルモルタルを先行して打設し、硬化が始まる前に上記廃棄物のうちソイルモルタ

ルよりも比重の大きい材料（コンクリート、アスファルト、ガラス片など）を投入し、沈める。ソイルモルタル量は多くなるが、廃棄物間に空洞などが残る可能性はない。

このような方法では、ソイルモルタルそのものもシールド発生泥土など建設廃棄物を原材料としているので、セメント以外はすべて廃棄物で賄われるということになる。いわばオール産業廃棄物人工地盤ということができる。



図4-15 スーパー堤防計画断面図（例）

（2）適用の現実性

小泉内閣の都市再生プログラムにおいて、東京圏におけるごみゼロ型都市への再構築は、具体的なプロジェクトとして検討段階に入っているが、首都圏における産業廃棄物の処理状況を種類別にみると図4-16に示す通りである¹²⁾。これによると各廃棄物とも再生利用の他、とくに減量化に対する比率が大きい、それでもなお最終処分量は年間750万トンにも上っている。そしてその最終処分の内訳は、図4-17に示すように¹²⁾、汚泥やがれき類等上記の埋立て材料がその大部分を占めることがわかる。汚泥を除く固形廃棄物と汚泥を用いてのソイルモルタルとの組合せの妥当性が理解されよう。

それらを具体化するためには、これまで述べてきた静脈物流における広域的なロジスティックシステムの構築が前提となるが、その背景として、以下のような視点における基本的、体系的なシステムの整備が急がれるところである¹³⁾。

- a. 要求性能、品質の明確化
- b. 期待する効果の持続時間、耐用年数の明確化
- c. 心材と廃棄物利用のランク分け
- d. 廃棄物利用を前提とした試験、基準の整備
- e. 廃棄物利用先の追跡調査、モニタリング
- f. 有害物の排除

一方、「再生利用認定制度」においては、汚泥を改良する業者が厚生大臣に申請すれば、改良する同一業者が汚泥を運搬することが可能となる。ただその適用に当たっては、高規格

堤防の位置や築造に用いようとしている再生品の数量、性状、使用時期などを明確にする必要があり、排出先1ヶ所に対して受け入れ側の高規格堤防も1ヶ所に制限されていることもあって、数ヶ所からの汚泥を1ヶ所の高規格堤防に再利用することは出来ない。

とくに最後の発生箇所と有効利用箇所とが一对一の制約である点を始め、まず規制ありきのもとでは真の意味の大変革をどの程度押し進められるか疑問であろう。

本章で提案した精密地盤改良システムの特徴は、複数現場からの SCM システムをキーワードのひとつとしている。スーパー堤防築造のような大規模な現場での適用により、大幅なコスト削減、環境保全、施工性向上といった多目的の施策を図ることが可能である。前節で触れたリスクマネジメントの視点も含めて解決すべき問題は多々あると思われるが、思いきった議論が展開されることを期待したい。

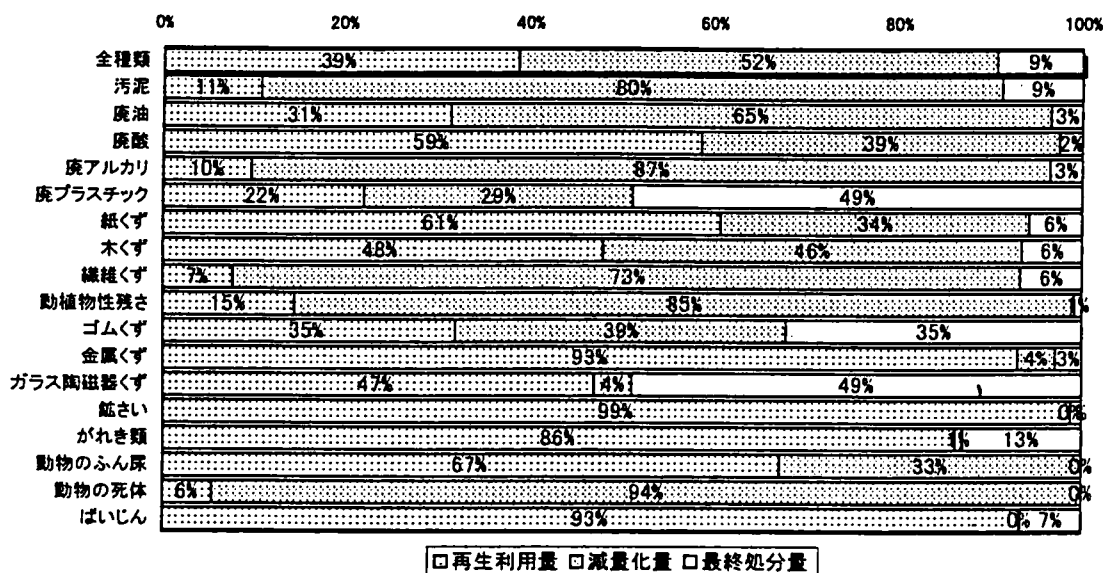


図 4-16 首都圏における産業廃棄物の処理状況¹²⁾

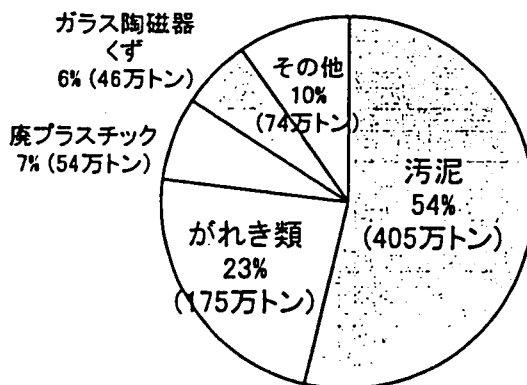


図 4-12 種類別最終処分量¹²⁾

4. 5 おわりに

本章では、ソイルモルタルによる汚泥等建設発生土の有効利用システムのうち、ReSM工法による埋戻し、空洞充填などの人工地盤築造を前提に、その計画・設計およびソイルモルタルの製造・運搬、品質管理を含む施工段階における以下の3つのシステムの統合の重要性について考察した。

とくにその中で、欧米で発展、普及している精密農法（Precision Farming）を発想の原点とした新しいマネジメントの概念を、精密地盤改良（Precision Soil Stabilization）と称して提案しており、累計確率管理手法をベースにした累積管理の考え方もその一端である。

また、ロジスティックシステムについては、ソイルモルタルの運搬という狭義のとらえ方ではなく、IT技術を駆使してその品質管理を中心に広く施工にも係わっていくという広義の視点が重要である。

そして、精密地盤改良とロジスティックという2つのシステムを補完すべく、リスクマネジメントシステム導入の重要性を論じ、施設完成後の運用、維持管理段階でのリスク対応との関連性についても言及している。

以上のような視点の下に提案した、オール再生利用廃棄物によるスーパー堤防築造構想についても、ひとつの考え方であり、それを実現するためには、上述の精密地盤改良といった新しいマネジメントの概念を導入し、以下のような課題を克服していく必要がある。

- ① 長期的問題：疲労、凍結融解、再々利用
- ② 境界問題：比重差や強度差といった異質物間の諸現象
- ③ 合意形成：商習慣・各種規制・縦割り行政

いずれにしても、それらの議論はその緒についたばかりであり、今後の研究展開が強く望まれるところである。

【 第4章 参考文献 】

- 1) 財団法人日本建築センター編集；建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針
ーセメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法，pp233～262,pp265～320,pp371
～473，1997 年
- 2) 社団法人土質工学会編；土質基礎の信頼性設計，pp155～270，1985 年
- 3) 山本正明，見坊東光；地盤工学における不確実性のモデル化について，地盤工学にお
けるリスク評価手法に関するシンポジウム発表論文集，pp29～34，1987
- 4) Sakae SHIBUSAWA; *Precision Agriculture to Wisdom Farming* , Special Lecture for
International Students , 東京農工大学講義資料，2001.7
- 5) 有岡正樹：BOT方式におけるリスク管理，日本リスク研究学会誌，Vol.8，No.1，
pp5～18，1997 年
- 6) 西野文雄監修，有岡正樹，有村靖男，大島邦彦，野田由美子，宮本和明：完全網羅
日本版PFI，山海堂，2001 年 4 月
- 7) 有岡正樹：建設事業におけるリスク，土木学会シンポジウム「社会基盤整備とリスク」
土木学会，1992 年 11 月
- 8) 地盤工学会 大深度地下構造物の設計施工技術に関する研究委員会：トラブル事例に学
ぶ大深度地下構造物の設計・施工，pp176～183，2001 年 6 月
- 9) 有岡正樹：BOT方式によるシドニー・ハーバー・トンネル建設，海峡横断 Vol.3
pp79～82，海洋架橋調査会，1995 年 10 月
- 10) 有岡正樹：海外でのBOT事業組成事例と日本版PFIへの示唆，土木学会誌 Vol.85，
pp27～30，Oct.2000
- 11) (財)先端建設技術センター：建設汚泥リサイクル指針，p33，大成出版社，1999 年
- 12) ごみゼロ協議会：東京圏におけるゴミゼロ都市への再構築に向けて（中間取りまとめ），
概要版 p25，2001 年 11 月
- 13) 嘉門雅史：建設における発生土の種類と処理・利用の問題点，基礎工，pp2～6，
1998 年 11 月

第5章 結論

5.1 総括

本論文で論じてきたソイルモルタルは、「土」と「水」および「セメント」の混合物であるが、建設発生土の主成分が粘性土で、粘土モルタルに代表されるように粘土鉱物が持つ界面化学特性を利用するものであり、いわゆる流動化処理土とは視点を異にしている。このため、粘性土をそのまま利用するのではなく、粉碎し汚泥化するものであることから、広い意味で建設汚泥の有効利用に直結していくことになる。

ここでは、本研究の主要な点を各章ごとに総括し、詳細な成果については、2章～4章の“おわりに”および次節の“適用分野ごとの結論”を参照願うこととした。

第1章では、このようなソイルモルタルの様々な高度利用化に焦点をあてて、その制度的課題や技術開発の現況を見直し、本論文における技術研究開発が時期を得たものであることの確信を得た。

第2章では、粘性土をベースにするソイルモルタルの持つ界面化学特性、流動性および密度といった材料特性と現場での適用性との相関に視点を当て、地盤注入、地中連続壁、埋戻し・空洞充填、表面遮水および気泡混合軽量土という5つの分野について、その適用性確認のための材料特性について各種実験を行い、それぞれの分野での実用性を確認した。

それら5つの分野における総括的な結論は以下の通りである。

- (1) 地盤注入材としての大阪粘土は、2ミクロン以下の粘土鉱物、しかも界面化学的性質の強いモンモリロナイトを多量に含有しており、その要件を満たすことが確認された。
- (2) 遮水壁としての開発した粘土モルタルの適用は、置換方式、泥水混合方式および泥水モルタル方式のいずれも極めて良好な成果を得た。このうち、泥水混合と泥水モルタルの2方式は当時では画期的な方式であり、その後の新しい土留壁構築方式の端緒とも言えよう。

とくに、泥水モルタル方式では、自硬性の安定液を使用することになるが、安定液として重要な粘性については、テルナイト等分散剤を併用することにより5～10時間適正な粘性を維持し、掘削安定液としての性能を確保できた。また、強度に与える影響も10時間の使用後についてでも、1/2程度の低下に収まっている。このように、粘土鉱物の持

つチキソトロピー効果が有効に発揮された。

(3) ReSMソイルモルタル工法

粘性土分を主体とするソイルモルタルは間隙比および含水比が高く、とくに変形（圧密）特性が重要となる。主要な点は以下の通りである。

- ① 圧密有効応力と間隙比との関係を示す圧縮曲線は、過圧密粘土の関係に類似するが、これは、セメントの水和反応により土の構造骨格が強化され、ある圧力までは圧縮性が小さく、ある圧力を過ぎると構造骨格の破壊が起こり、変形が急に大きくなることを示す。
- ② ソイルモルタルとセメンテーションを有する自然粘土（とくに洪積粘土）との圧縮特性は、一見類似しているものの、固結作用の程度とその性質はかなり異なっており、別の手法で取り扱う必要がある。
- ③ 一軸圧縮強度と圧密降伏応力の関係について、今回の試験結果では、 $q_u=0.717p_{28}$ という関係があり設計では強度が優先することが確認された。
- ④ 養生期間が圧縮特性に与える影響は、セメント量が同一であれば、圧縮曲線は養生日数にほとんど左右されず、養生日数が増加すると降伏応力値も増加するが、強度の増加する比に比べその割合ははるかに小さく、打設後初期段階ではとくに強度特性が優先することが知られた。また、養生期間が短い供試体（例えば1週間）の圧密試験により求めた降伏応力値は、設計における変形特性の評価においては安全側である。

(4)表層遮水工法

ひび割れは、プラスチック収縮と乾燥収縮とが係わるが、前者は引張強度に関係するものでありセメント量の影響を受ける。また、後者は含水量に関係するものであり単位骨材量により左右される。ひび割れを生じさせないための方策としては、セメント量の増加が主で、残土量の増加が従ということになる。また、体積～表面積比が、ひび割れの本数およびひび割れ幅との関係で重要重要なパラメーターとなる。

斜面での自然流下現象については、当然のことながら、ソイルモルタルの流動性に大きく影響され、きわめて有意な相関性が見られる。とくに、公団式フロー値とそれらのパラメーターの間には高い相関があり、実用に際しての有意な指標となろう。

(5)気泡混合軽量土

圧密試験結果においても、明確な圧密降伏応力が見られる等、強度・変形特性については通常のソイルモルタルと同様と考えることができる。ただ、水中打設（水圧下での養生）が強度に与える影響は、試験上の不確定要素もあって、明確な相関を得ることができなかったが、強度が $1/2$ 以下に低下し、気泡容積の $1/3$ 相当分が体積減少となって現れる等、気泡混合軽量土を水中打設する場合には、大規模な現場実験を行って、その挙動を確認した上で設計する必要があることが示唆された。

第3章では、第2章で確認した適用分野ごとのソイルモルタルの材料特性を現場に反映させ、それぞれの分野で大きな成果を得たことを確認し、また、さらなる研究開発展開への様々な示唆を得た。それらの主要な点は以下の通りである。

(1)地盤注入工法

滞水砂礫層シールド工事の遮水工法としての本採用には至らなかったが、以下のような条件を前提に今後のさらなる研究開発の可能性を残した。

地盤条件：透水係数 10^{-1}cm/sec 以上の砂礫層やシルト層

粘土条件：付近で多量のローカルクレイが得られ、粘土鉱物が多く含まれていること。

注入範囲：線としての改良よりマスとしての改良に適する。また量も多いこと。

注入方式：二重管注入方式やマンシュート注入方式のように、ある程度高圧注入の可能な方法またはジェットグラウドなど。

(2)遮水壁工法

豎坑遮水壁の現場実験の結果、全ての方法について有効な遮水効果を確認したが、現実の工事では、その大部分をPIP方式により延べ $13,000\text{m}^2$ の遮水壁を施工した。現場実験レベルではともかく、これだけの量の工事を行うには大量の粘土粉碎方法が問題になる。実験では鋼球を用いてのボールミルタイプを採用したが、本工事では多羽根式スライスタブを採用した。この経緯が、ReSM工法においてミキサー車内に羽根とピアノ線を併用するという展開に発展している。

それ以外の工事では、製品としての岡山産粘土を使用した。これまでは壁土等にしか使用されなかった材料が、シールド裏込め注入材料など土木資材として汎用的に使用され出した契機ともなった。

(3)ReSMソイルモルタル工法

本工法の現場での適用に係わる主要な知見は以下の通りである。

① これまでの流動化処理土やソイルモルタルが大型固定プラントで製造されたのに対し、ReSM工法では、粘性土の粉碎をベースに製造と運搬とをミキサー車で行うという極めてシンプルなシステムで、土砂発生現場が品質を作り出すことになる。

② 大阪地下鉄7号線での適用事例

平成6～9年にかけて施工された大阪市地下鉄大正延伸工区（15～20工区）では、17～20工区の4工区が担当する土圧シールド区間で発生する流動化した土砂を、ReSM工法によりソイルモルタル化して、15～20の6工区における開削工法停留上部の側部および頂部の埋戻しに材料として有効利用した。一部搬入土使用部分を含め、総量は $22,643\text{m}^3$ に達しており、有効利用率は全シールド発生土砂量の10%強となっている。

③ 今回のような埋戻しの設計については、コンクリート構造物等とは異なりマスで評価することが重要となる。そのような観点から、「打設量」と「打設量」×「一軸圧縮強度」のそれぞれの累積値の関係図で管理するという新しい手法を取り入れ成果を得た。

⑤ ソイルモルタルによる埋戻しの効果として、多種多様な埋設物の受け防護等、通常の土砂による埋戻しでは不可能な個所にもきめ細かく充填され、将来の路面沈下や陥没の可能性に対する不安を払拭できた。また、側部についても狭隘な場所での支保工盛換え作業や、水締め等施工難度の高い要求品質に取って代わって、安全で簡便な施工法に

よることができた。SMW工法によるたわみ性土留壁の変形についても、埋戻し支保工撤去時の方が掘削支保工架設時よりも大きいことが希でないという、これまでの傾向をうち破る、極めて良好な結果を得た。

- ⑥ そのほかのReSM工法採用事例として、琵琶湖第二疎水トンネルの作業坑、斜坑および水平坑の埋め戻し工事（計14,585m³：水平坑頂部等の一部気泡混合軽量土使用）およびタンク基礎埋め戻し工事（580m³）がある。何れも良好な結果を得た。

第4章では、ソイルモルタルによる泥土等建設発生土の有効利用システムのうち、ReSM工法による埋戻し、空洞充填などの人工地盤築造を前提に、その計画・設計およびソイルモルタルの製造・運搬、品質管理を含む広義のロジスティックシステムの考え方について言及し、そのマネジメントシステムの適用分野の例として、オール再生利用廃棄物によるスーパー堤防築造の考え方について考察した。

とくにその中で、欧米で発展、普及している精密農法（Precision Farming）を発想の原点とした新しいマネジメントの概念を、精密地盤改良（Precision Soil Stabilization）と称して提案しており、累計確率管理手法をベースにした累積管理の考え方もその一端であるが、いずれにしてもそれらの議論は、その緒についたばかりである。リスクマネジメントの概念をも整合させながら、今後研究展開に意を傾けたい。

また、オール再生利用廃棄物によるスーパー堤防築造構想についても、ひとつの考え方であり、それを実現するためには、上述の精密地盤改良といった新しいマネジメントの概念を導入し、引き続き制度的、商習慣的課題を克服していく努力の必要性を強調しておきたい。

5.2 適用分野ごとの結論

本文中では上記5.1でも述べたように、ソイルモルタルのいくつかの高度利用分野に関し、第2章でその概念とそれに適合した材料特性の研究開発について、第3章ではそれらの現場適用事例について、それぞれ分けて議論してきた。一部重複するが、ここでは、それらの適用分野ごとの材料特性（室内実験的研究成果）とその現場での適用性とを総括して結論としたい。

（1）地盤注入工法

（a）材料特性

- ・粘土注入剤としての要件は、

- ① ブリージングが少ない
- ② 適当な粘性により注入範囲をコントロール出来る
- ③ 地下水流等により拡散、希釈されない強度を有する

等があげられるが、大阪粘土は2ミクロン以下の粘土鉱物、しかも界面活性的性質の強いモンモリロナイトを多量に含有しており、これらの条件を満たすことが確認された。

- ・数多くの室内試験を行った結果、諸要素がホモゲルの強度に及ぼす影響については、水セメント比の減少、ベントナイト比の増加、全体としての水比の減少等が総括的に影響を与えることが知られた。これを注入された状態で評価するために、サンドゲルによる試験を行い、ホモゲル強度が低いものほどサンドゲルとした場合の強度増加が大きく、セメントやベントナイトといった有価物を抑えても効果が見込めることも確認された。

（b）現場での適用結果

- ・現場注入実験は2回行ったが、1回目は室内実験で選定されたホモゲルについて、ロッド注入及びマンシュート注入の2通りの注入方式で実施した。現場透気試験結果において成果が見られたが、豎坑掘削に伴っての確認では対象の砂礫層への注入はごく一部を除いて確認されず、上部シルト層との層境界へ版状または脈状に注入が集中する結果となった。
- ・2回目については、注入剤の粘性やゲルタイムといった材料面と注入方式の検討を行い、前者については水ガラスの併用、後者についてはマンシュート注入の他にストレーナ注入や2重管注入方式にチャレンジした。第2次立坑掘削時において砂礫層への注入状況の確認と、原位置透水試験結果により2オーダーの透水係数改良成果が確認された。
- ・滞水砂礫層シールド工事の遮水工法としての本採用には至らなかったが、以下のような条件を前提に今後のさらなる研究開発の可能性を残した。

地盤条件：透水係数 10^{-1}cm/sec 以上の砂礫層やシルト層

粘土条件：付近で多量のローカルクレイが得られ、粘土鉱物が多く含まれていること。

注入範囲：線としての改良よりマスとしての改良に適する。また量も多いこと。

注入方式：二重管注入方式やマンシュート注入方式のように、ある程度高圧注入の可能な方法またはジェットグラウドなど。

（２）遮水壁工法

（ａ）材料特性

- ・遮水壁構築の方法として、柱列杭方式と連続壁方式の２種類を前提に、とくに後者については置換方式、泥水混合方式および泥水モルタル方式の３方式を開発した。中でも、泥水混合と泥水モルタルの２方式は当時では画期的な方式であり、その後の新しい土留壁構築方式の端緒とも言えよう。
- ・泥水モルタル方式では、自硬性の安定液を使用することになるが、安定液として重要な粘性については、テルナイト等分散剤を併用することにより５～１０時間適正な粘性を維持し、掘削安定液としての性能を確保できた。また、強度に与える影響も１０時間の使用後についてでも、１／２程度の低下に収まっている。このように、粘土鉱物の持つチキソト

ロピー効果が有効に発揮された。

（ｂ）現場での適用結果

- ・豎坑遮水壁の現場実験の結果、全ての方法について有効な遮水効果を確認したが、現場採取試料についての強度面において、泥水混合方式及び泥水モルタル方式は、PIP方式や置換方式に比べ強度が大きくなる方向でバラツキが目立った。この２つの方式は掘削中の泥水に地山の土砂が混入され強度が増加する可能性が多いことを示唆している。
- ・現実の工事では、その大部分をPIP方式により延べ１３,０００ｍ^２の遮水壁を施工した。現場実験レベルではともかく、これだけの量の工事を行うには大量の粘土粉碎方法が問題になる。実験では鋼球を用いてのボールミルタイプを採用したが、本工事では多羽根式スライスタイプを採用した。この経緯が、ReSM工法においてミキサー車内に羽根とピアノ線を併用するという展開に発展している。
- ・それ以外の工事では、製品としての岡山産粘土を使用した。これまでは壁土等にしか使用されなかった材料が、シールド裏込め注入材料など土木資材として汎用的に使用され出した契機ともなった。
- ・また、泥水混合方式は、安定液を固化させて土留め、遮水壁とする工法（ケイソイル工法）へと発展したが、水ガラスを用いて短時間に硬化させる点や、エアブローで攪拌を行う等の新しい技術が導入された。

（３）埋戻し・充填工法（ReSM工法）

（ａ）材料特性

① 強度特性

- ・粘土モルタル遮水壁の場合と同様、泥水の比重と単位セメント量との関係で任意の弱強度ソイルモルタル作成が可能となることが確認され、とくにセメント量により影響を受けるが、養生期間が長いものほどセメント量の影響が大きく、また、セメント量の少ないものは養生期間の影響も小さい。

② 圧密特性

粘性土分を主体とするソイルモルタルは間隙比および含水比が高く、とくに変形（圧密）特性が重要となる。

- ・供試体は、時間と共に硬化が進むため、短時間で試験が可能な定ひずみ速度圧密試験を採用した。圧密有効応力と間隙比との関係を示す圧縮曲線は、過圧密粘土の関係に類似するが、これは、セメントの水和反応により土の構造骨格が強化され、ある圧力までは圧縮性が小さく、ある圧力を過ぎると構造骨格の破壊が起こり、変形が急に大きくなることを示す。セメント量が多いほど間隙比が小さく、かつ圧密降伏応力も大きくなる。
- ・洪積粘土との比較では、洪積粘土のようにセメンテーション有する粘土は、圧密降伏後繰り返した粘土の圧縮曲線（基準曲線）に近づき平行となるが、ソイルモルタルの場合は、セメントを混合しない廃泥の基準曲線比べはるかに変形勾配が急で、平行的に漸近する傾向は見られない。ソイルモルタルとセメンテーションを有する自然粘土との圧縮特性は、一見類似しているものの、固結作用の程度とその性質はかなり異なっており、別の手法で取り扱う必要がある。
- ・一軸圧縮強度と圧密降伏応力の関係について、今回の試験結果では、 $q_u = 0.717p_{28}$ という関係があり設計では強度が優先することが確認された。ただ、強度がある程度大きくなると、強度が増加しても圧密降伏応力がほとんど増加しないという報告もあり、強度だけで評価すると予想外の変形を伴うこともあり得ることに留意が必要である。
- ・養生期間が圧縮特性に与える影響は、セメント量が同一であれば、圧縮曲線は養生日数にほとんど左右されず、養生日数が増加すると降伏応力値も増加するが、強度の増加する比に比べその割合ははるかに小さく、打設後初期段階ではとくに強度特性が優先することが知られた。また、養生期間が短い供試体（例えば1週間）の圧密試験により求めた降伏応力値は、設計における変形特性の評価においては安全側である。

③ 透水特性

- ・圧密試験結果ら求めた透水係数は、過圧密領域についてはセメント量に係わらずオーダーとして $1 \times 10^{-3} \text{ cm/day}$ ($1 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$) と十分な止水性を有することが確認された。

(b) 現場での適用結果

① 全般

- ・これまでの流動化処理土やソイルモルタルが大型固定プラントで製造されたのに対し、ReSM工法では、粘性土の粉碎をベースに製造と運搬とをミキサー車で行うという極めてシンプルなシステムで、土砂発生現場が品質を作り出すことになる。

- ・そのシステムの的な特徴として、
 - a) プラントが不要で、都市土木に適している
 - b) 処理量の増減に容易に対応できる
 - c) シンプルで故障等が少なく、
 - d) 全体システムとして安定性が高い

また、品質面では、

- a) 品質は土砂発生側で作り出すため、発生土砂の特性に対しての管理が可能となる
- b) 砂礫やコンクリートガラが混入していても、ミキサー混合が可能
- c) 長時間の品質安定性が維持できる

などの優位性が確認された。

② 大阪地下鉄7号線での適用事例

- ・平成6～9年にかけて施工された大阪市地下鉄大正延伸工区（15～20工区）では、17～20工区の4工区が担当する土圧シールド区間で発生する、流動化した土砂をReSM工法によりソイルモルタル化して、15～20の6工区における開削工法停留上部の側部および頂部の埋戻しに材料として有効利用した。一部搬入土使用部分を含め、総量は22,643m³に達しており、有効利用率は全シールド発生土砂量の10%強となっている。
- ・施工の手順は、要求される配合（標準配合をベースに発生土砂の土質や比重に応じて、また、埋め戻し部位等使用目的に応じて、セメントおよび追加水量を調整）に対し、水・セメントを先行して計量投入し、残り5m³になるように発生土を投入するという、いわゆる容積管理によることが特徴である。
- ・関連要素のいくつかの相関関係としては以下の通りである。
 - a) 発生土砂単位体積重量と処理土単位体積重量：側部ではセメント量を増やし追加水量を減少させたため、頂部に比べ処理土重量が0.2g/cm³程度大きい
 - b) フロー値と処理土単位体積重量：土質に応じて10～25秒に調整された結果であり、とくに相関はない
 - c) 発生土および処理土単位体積重量と強度：側部において正の緩い相関が見られるが、頂部についてはほとんど単位体積重量の影響を受けない
 - d) 発生土利用率や加水量についても、強度との相関は見られない。
- ・セメント量以外の要因が強度に与える影響を分離することが出来なかったが、セメントについては加水量との比、とくに想定全水量との比で相関はより明確になる。今回の工事ではシールド掘進管理データによる含水量をベースに配合を設定したため、発生土もしくは処理土の含水量をその都度正確に測定するまでには至っていないが、簡便な方法でこまめに確認できれば品質管理精度が増すことになろう。
- ・上述のように強度はセメント量に大きく影響を受けるが、一軸圧縮試験結果の頻度分布で整理する限り実用的に良好な結果を得ている。また、1週養生と4週養生の関係も良好

な相関を示しており、現場での品質管理は1週強度（場合によっては3日強度）で代用できるといえる。

- ・今回のような埋戻しの設計については、コンクリート構造物等とは異なりマスで評価することが重要となる。例えば全体が100m³という埋め戻しに当たり、20台分全量が目標強度の1/2であれば問題は大きくなるが、処理土の単位体積重量等により安全側の補正をこまめに行うことにより、埋戻し地盤というマス構造としての機能は果たされとの考えで整理し、「打設量」と「打設量」×「一軸圧縮強度」のそれぞれの累積値の関係図で管理するという新しい手法を試みた。その結果、頂部については150～200kN/m²の範囲内に、また側部については800kN/m²以上によく管理されており、ソイルモルタルによる人工地盤としての機能が確認された。
- ・ソイルモルタルによる埋戻しの効果として、多種多様な埋設物の受け防護等、通常の土砂による埋戻しでは不可能な個所にもきめ細かく充填され、将来の路面沈下や陥没の可能性に対する不安を払拭できた。また、側部についても狭隘な場所での支保工盛換え作業や、水締め等施工難度の高い要求品質に取って代わって、安全で簡便な施工法によることができた。SMW工法によるたわみ性土留壁の変形についても、埋戻し支保工撤去時の方が掘削支保工架設時よりも大きいことが希でないという、これまでの傾向をうち破る、極めて良好な結果を得た。

③ その他の実施例

- ・そのほかのReSM工法採用事例として、琵琶湖第二疎水トンネルの作業坑、斜坑および水平坑の埋め戻し工事（計14,585m³：水平坑頂部等に一部気泡混合軽量土使用）およびタンク基礎埋め戻し工事（580m³）がある。何れも良好な結果を得た。

（４）表層遮水工法

（a）材料特性

① ひび割れの発生メカニズム

- ・含水比が高く廃泥利用率が相対的に低い今回のソイルモルタルでは、ひび割れが問題となる。ただ、一般的な埋戻しは大部分が地盤内で、表面のひび割れは起こりにくく、また大きな問題になるものではない。一方、表層遮水層等ではその影響は無視できないものとなる。
- ・ひび割れは、プラスチック収縮と乾燥収縮とが係わるが、前者は引張強度に関係するものでありセメント量の影響を受ける。また、後者は含水量に関係するものであり単位骨材量により左右される。
- ・容器等の限界もあるが、ソイルモルタルの構成要因がひび割れに与える影響は、セメント量が最も顕著で、単位セメント量が 0kgでひび割れ隙間幅が5mm、250kgで0.7mmとなっている。プラスチック収縮が優先することの証でもあり、ひび割れを生じさせ

ないための方策としては、セメント量の増加が主で、残土量の増加が従ということになる。

② 流動性の確認

- ・斜面での自然流下現象については、側部を拘束された溝状の斜面を1次元的に流化させて勾配がひび割れに与える影響を見る実験と、いまひとつ斜面を側方にも広がることを認め2次元的に流下させる場合について、材料の流動性（粘性、フロー値）が、勾配の変化と共にその広がりや打設高さにどう影響を与えるかを見るものである。後者については、直接流下打設と階段状打設の2種類行っている。
- ・例えば、公団フロー値と打設高さとの関係に見るように、斜面に対する打設結果は、当然のことながら、ソイルモルタルの流動性に大きく影響され、きわめて有意な相関性が見られる。このためソイルモルタル流動性とその構成要素である使用土量、加水量、セメント量等によりどう影響されるかが重要となるが、公団式フロー値とそれらのパラメーターとの間には高い相関があり、実用に際しての有意な指標となろう。
- ・ひびわれについては、ひび割れ本数とひび割れ幅が逆相関の関係にあり、体積～表面積比が重要なパラメーターとなる。その比が小さい場合には、打設高が薄くなり乾燥収縮が卓越して細かいひび割れが多数発生することになるが、逆に体積～表面積比が大きくなると乾燥収縮が起こりにくくなり、ひび割れ本数が少なくなる。ただ後者の場合は、一端起きたひび割れが深部に進行していくため、測定できる表面でのひび割れ幅が相対的に大きくなることが考えられる。

（b）現場での適用結果

- ・現場実験では、盛り込みすぎた実験メニューに比して現場規模や周辺環境が不十分で、定量的な成果をあげることができなかったが、その可能性について示唆を得ることができたと評価される。

（5）軽量土埋立て工法

（a）材料特性

- ・気泡混合軽量土の材料特性に関係する基本パラメーターは、軽量土の密度、単位体積当たりの気泡量およびセメント量（土粒子量および水量はこれらの関数）とすると、
 - a) フロー値およびブリージング量は、セメント量とは正の相関、密度と気泡量とは負の相関にある
 - b) 一軸圧縮強度および三軸圧縮試験（UU）による粘着力成分は、3つの基本パラメーターの全てと正の相関にある
- ・圧密試験結果においても、2章のソイルモルタルと同様明確な圧密降伏応力が見られる。その値は3つの要因とは正の相関であり、逆に圧縮指数は負の相関となる。
- ・水中打設（水压下での養生）が強度に与える影響は、試験上の不確定要素もあって、

明確な相関を得ることができなかったが、強度が1/2以下に低下する可能性も十分あり得ることことが示唆された。また、減容については含まれる気泡容積の1/3相当分が体積減少となって現れ、これが全て消泡と仮定すると、気泡部分の容積が2/3に減少したことになる。いずれにしても、気泡混合軽量土を水中打設する場合には、大規模な現場実験を行って、その挙動を確認した上で設計する必要があるだろう。

(b) 現場での適用結果

- ・第2疎水トンネル作業坑等の埋戻しに当たり、水平坑部分の頂部の充填をより確実にするために気泡軽量ReSM工法を採用した。地下100mに位置するためその確認には至っていない。
- ・また、パイプライン埋め戻し現場実験工事では、浮力を抑えるために管の下部について気泡混合軽量土を使用した。が、気乾養生を行った供試体の強度が、材令と共に低下する現象が確認された。気泡混合土には、解決すべき課題が多い。

謝 辞

大学および大学院時代は、一貫して異方性岩盤の研究に情熱を傾けてきましたが、建設会社に就職後は、ダムや山岳トンネルといった「硬い」岩を扱う現場ではなく、都市部の地下鉄現場に勤務することになり、一転粘土や砂といった相対的に「柔らかい」地盤に対峙することになったことが、本研究のきっかけと言えます。

都市土木では、地盤工学的に「強度が低く含水比の高い沖積粘土層」と「地下水位が高い砂層」が設計、施工段階で常に課題でした。そのような中で地下鉄現場配属となった私の課題の一つが、その処理に難題を抱える粘性土の有効利用でした。その後30余年にわたりライフワーク的テーマとして今日に至った次第です。私のキーワードの一つに「Re-エンジニアリング」という言葉がありますが、これは昨今流行の組織のリストラに関係するものではなく、“Recycle”, “Reuse”, “Renewal”, “Rehabilitation”, “Reproduction”, “Reservation”等々“Re”で始まる多くの英語の言葉を、建設エンジニアリングの視点で体系づけようものである。

ライフワークとして、「意識」と「情熱」を傾けてこの「Re-エンジニアリング」に取り組んで行きたいとの思いを、京都大学大学院土木工学専攻教授足立紀尚先生にぶつける機会が何度かありましたが、その経緯の中でこれまでの成果を学位論文としてまとめるように示唆いただいたのは、もう4、5年前になろうかと思います。その後も、機会あるごとにご指導いただき、また勇気づけていただきました。

まず冒頭に、足立紀尚先生に心より深く感謝申し上げます。

本論文をご一読いただいてご理解いただけるように、研究の多くの部分は、途中オーストラリア駐在の7年余を挟んで、2回にわたる大阪市交通局の地下鉄工事に関連するものであります。

その端緒となった2号線今市工区で当時第一建設事務所長であられた大阪市交通局の平田武弘氏（のち建設技術本部長を経て現在㈱クボタ他顧問）には、その後現在にいたるまで直接的、間接的に多大のご指導をいただきました。また、後半の7号線関係においては、ReSMソイルモルタル工法について所轄の西長堀支所所長江坂匡示氏（故人）ならびに当時建設技術本部長の岸尾俊茂氏（現大阪市交通事業振興公社理事長）および葛野恒夫（現㈱大阪港トンスポートシステム副社長）に、その採用について多大なご理解とご指導を得ました。もちろんここにお名前を上げた方々以外の、多くの大阪市交通局職員の皆様にご支援いただいたことは言を待ちません。

関係各位すべての方々に改めて深甚の謝意を表するものであります。

学術研究的分野でも、多くの先生方にご指導を受けました。

まず、粘土注入および粘土モルタル遮水壁技術の研究開発とその技術の滞水砂礫シールド工法への適用については、当時京都大学防災研究所教授の故村山朔郎先生ならびに京都大学工学部交通土木工学教室教授の赤井浩一先生（京都大学名誉教授、現在 財団法人地域地盤環境研究所理事長）には多大なご指導をいただきました。とくに赤井浩一先生には、学部および大学院時代の岩盤力学に関する指導教授として公私にわたり多大のご指導を賜り、またその後今日にいたるまでご厚誼をいただいているところであります。当時赤井研究室の学生諸君が入れ替わり立ち代わり、現場実習を兼ねて粘土モルタル研究開発の実験や現場調査などを手伝ってくれたのを思い出しております。

ReSMソイルモルタル工法関係では、地下鉄7号線関係で地下工事全般について先述の足立紀尚先生にご指導いただきました。

また、その後のさらなる研究開発に当たっては、とくにソイルモルタルの圧密特性に関する研究に際し、数多くの実験を含め、福山大学工学部教授柴田徹先生（京都大学名誉教授）ならびに平川脩士先生に多大のご指導、ご支援をいただきました。とくに柴田徹先生には、筆者が在学中一時赤井研究室の助教授であられたこともあって、他の研究会などを通して30年にわたりご厚誼いただいているところであります。

表面遮水工法への展開に関しては、京都大学大学院土木システム工学専攻建山和由先生にひび割れ発生問題等の実験的研究について多大なご指導、ご支援をいただきました。また、今回の論文作成に当たり学究の先輩としていろいろご相談に乗っていただきました。

最後に、京都大学大学院環境地球工学専攻嘉門雅史先生には、建設発生土の有効利用に関する制度的、技術的現況とその課題について、政府関係委員等の立場も含めて大所高所から様々なご指導をいただきました。

以上それぞれの分野においてまさに第一人者であられる諸先生方のご指導を得られたことは、望外の良縁でありました。ここに深く感謝申し上げる次第であります。

いまひとつ影に日なたに、そして実務的に力になっていただいた筆者の勤務先である(株)熊谷組関係者の方々（肩書きはいずれも当時）について触れておかねばなりません。

地下鉄工事現場での研究開発に関連して、前半の約15年については、地下鉄今市作業所所長箭本実氏、同次長堀家茂一氏、主任前田純一氏、さらには同期の富永克巳氏など、また地下鉄大日、新金岡両作業所では斎藤修所長他関係職員と労苦を共にしたことを思い出しております。

また、後半の地下鉄7号線関係では、森邦夫氏、後藤徳善氏、中央マテリアルから出向同然の立場で許任天女史に、ReSM工法の開発に専念していただいたものでした。

中でもとくに、宮下裕美氏には筆者が係わったすべての地下鉄工事における工務関係の責任者として、施工計画や工事記録の取りまとめに多大な尽力をいただきました。今回の研究成果にそれらが多く反映されているところであります。

その後現場を離れ本社のエンジニアリング本部を担当する中で、表面遮水工法や気泡混合軽量ReSM工法の新しい研究開発展開には、上述の森邦夫氏ならびに藤木廣一氏他技術研究所スタッフの尽力に負うところが極めて大きいといえます。

とくに現在は㈱ガイテック代表取締役社長で活躍中の森邦夫氏については、本学位論文に関わる研究のパートナーとして、各種の実験的研究のみならず精密地盤改良システムの考え方など、多方面にわたり望外かつ多大の助力をいただきました。

以上のほか、30余年にわたるライフワークの仲間は、現場での実験等実業に携わっていた協業業者のスタッフを含め、100人近いものとなるであろうと思います。これら多くの仲間に、心よりお礼を申し上げるものであります。

ここ2、3年は、会社員としての日常業務の傍ら、本論文の執筆をはじめ、建設産業界のあり方を見つめての「21世紀 建設産業はどう変わるか」（鹿島出版会、2001年1月）、新しい公共事業のあり方を模索しての「完全網羅 日本版PFI」（山海堂、2001年3月）といった図書出版に共著者として係わり、これまでの経験、実績を総括する機会を得ました。これらの成果を生かしながら、海外での貴重な経験も踏まえて、学際的、業際的、国際的に社会貢献できるよう一層の努力をいとわないことを改めて決意し、本論文を閉じるものであります。

平成14年1月